BULLETIN TECHNIQUE 13

AGDEX 570

CONSEIL
DES
PRODUCTIONS
VÉGÉTALES
DU QUÉBEC

La dégradation des sols agricoles

Causes,
effets,
prévention
et correction

Québec

87-03202/

LA DÉGRADATION DES SOLS AGRICOLES AU QUÉBEC:
Causes, effets, prévention et correction

Rédigé par Bruno Gosselin
en collaboration avec les membres de la section
physique de la commission des sols du Conseil
des productions végétales du Québec

Rémi Asselin (Hydraulique)
Claude Bernard (Erosion hydrique)
Denis Côté (Structure)
Christian De Kimpe (Matière organique)
Marc R. Laverdière (Contamination)
Angus F. MacKenzie (Acidité)
Guy Mehuys (Compaction)
Léon E. Parent (Sols organiques)
Alain Pesant (Erosion éolienne)

Dépôt légal
Bibliothèque Nationale, 4e trimestre 1986
ISBN-2-550-16656-6

AVANT-PROPOS

Ce document fait suite à un mandat confié à la section physique de la commission des sols du Conseil des productions végétales du Québec par le sous-ministre de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Il a pour objectif de diffuser, chez les professionnels de l'agricultures, les pratiques culturales visant la conservation des sols dans les conditions nouvelles d'exploitation agricole et de respect de l'environnement.

Cette revue traite de la problématique, des processus, de l'importance économique de même que des solutions à la dégradation des sols. Par contre, elle ne peut répondre à toutes les interrogations concernant la conservation des sols en raison d'une recherche insuffisante sous nos conditions climatiques particulières.

SECTION PHYSIQUE DES SOLS

ASSELIN, Rémi - Ingénieur et agronome, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Nicolet.

BERNARD, Claude - Agronome, ministère de l'Environnement du Québec, Sainte-Foy.

COTÉ, Denis - Agronome, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Sainte-Foy.

DE KIMPE, Christian - Chercheur scientifique, Agriculture Canada, Sainte-Foy.

LAVERDIÈRE, Marc - Agronome, Université Laval, Sainte-Foy.

MACKENZIE, Angus F. - Agronome, Université McGill, Sainte-Anne-de-Bellevue.

MEHUYS, Guy - Professeur, Université McGill, Sainte-Anne-de-Bellevue.

PARENT, Léon-E. - Agronome, Université Laval, Sainte-Foy.

PESANT, Alain - Agronome, Agriculture Canada, Lennoxville.

ÉDITION

GOSSELIN, Bruno - Agronome, Service des Analyses environnementales, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

HAYART, Guy - Agronome, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentaiton du Québec, Québec.

VÉZINA, Sylvie - Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE DE LA DÉGRADATION DES SOLS 13

CHAPITRE 2

NATURE DES PROCESSUS DE DÉGRADATION DES SOLS 19
2.1 **Relations entre les diverses formes de dégradation des sols** 20

2.2 **Matière organique** 22
2.2.1 Définition 22
2.2.2 Rôle de la matière organique 22
2.2.3 Niveau d'équilibre de la matière organique dans les sols cultivés 24
2.2.4 Perte de matière organique occasionnée par la culture 25
2.2.5 Dynamique de la dégradation de la matière organique 25

2.3 **Structure des sols** 27
2.3.1 Définition 27
2.3.2 Développement ou dégradation de la structure 28
2.3.3 Symptômes de l'affaiblissement de la structure 28
2.3.4 Facteurs aggravants la détérioration de la structure du sol 28
2.3.5 Rôle des vers de terre sur le développement de la structure 29
2.3.6 Action du gel sur la structure 29
2.3.7 Travail du sol en rapport avec le contenu en humidité et la structure 31

2.4 **Compaction des sols** 33
2.4.1 Symptômes de la compaction du sol 33
2.4.2 Facteurs aggravant la compaction 33
2.4.3 Effets de la compaction sur les cultures et le sol ... 34
2.4.3.1 Effets sur la germination et la levée des plantes 34
2.4.3.2 Effets sur le système radiculaire 34
2.4.3.3 Effets sur la nutrition minérale et l'absorption de l'eau 34
2.4.3.4 Effets sur le rendement des récoltes 36
2.4.3.5 Effets sur le drainage 36
2.4.3.6 Effets sur la demande d'énergie 36
2.4.3.7 Effets sur la matière organique 38
2.4.4 Évaluation de la compaction 38

2.5 **Érosion hydrique** 39
2.5.1 Types d'érosion du sol 39
2.5.1.1 Érosion en nappe 39
2.5.1.2 Érosion en rigoles 39
2.5.1.3 Érosion en ravins 39
2.5.2 Mécanisme de l'érosion hydrique 40
2.5.3 Facteurs influençant l'érosion hydrique 40
2.5.3.1 Intensité des précipitations 40
2.5.3.2 Pente du terrain 41
2.5.3.3 État physique du sol 41
2.5.3.4 Couvert végétal et résidus de culture 41
2.5.4 Effets de l'érosion hydrique 43

2.6 **Érosion éolienne** 44
2.6.1 Facteurs influençant la résistance des sols à l'érosion éolienne 44
2.6.1.1 Stabilité de la structure 44
2.6.1.2 Contenu en eau du sol 45
2.6.1.3 Contenu en matière organique des sols minéraux 45
2.6.1.4 Vitesse du vent 45
2.6.1.5 Couvert végétal 46
2.6.1.6 Rugosité de la surface 46
2.6.1.7 Longueur des champs 46
2.6.2 Dommages occasionnés par l'érosion éolienne 46
2.6.2.1 Dommages a la végétation 46
2.6.2.2 Dispersion des éléments fins du sol 47
2.6.2.3 Vent comme moyen de transport 47
2.6.2.4 Destruction des sols organiques 47

2.7 **Acidification des sols** 48
2.7.1 Influence de la roche mère sur l'acidité des sols 48
2.7.2 Symptômes de l'acidification des sols 48
2.7.3 Effets de l'acidification des sols 49
2.7.4 Facteurs contribuant à l'acidification des sols 49
2.7.4.1 Engrais chimiques 49
2.7.4.2 Précipitations acides 51
2.7.4.2.1 Impacts des dépôts acides sur les cultures 54
2.7.4.2.2 Effet fertilisant de l'azote et du soufre contenus dans les précipitations acides 54

2.8 **Contrôle de l'eau du sol** 55
2.8.1 Effets de l'excès d'humidité des sols 55
2.8.2 Conséquences de l'excès d'humidité des sols 55
2.8.3 Problèmes associés au drainage superficiel 56
2.8.4. Problèmes associés au drainage souterrain 56
2.8.5 Problèmes associés au creusage des fossés et des cours d'eau 58
2.9 **Affaissement des sols organiques** 59
2.9.1 Processus de l'affaissement des sols organiques 59

2.10 **Contamination des sols** 61
2.10.1 Boues résiduaires 61
2.10.1.1 Boues et risques de contamination de l'eau et des sols 61
2.10.2 Pesticides 66

CHAPITRE 3

IMPORTANCE DES PROBLÈMES DE LA DÉGRADATION DES SOLS ET ÉVALUATION DES IMPACTS ÉCONOMIQUES AU QUÉBEC 69

3.1 **Répartition des cultures** 70

3.2 **Matière organique** 72

3.3 **Structure du sol** 73

3.4 **Compaction du sol** 74

3.5 **Érosion hydrique** 76

3.6 **Érosion éolienne** 78

3.7 **Acidité des sols** 79

3.8 **Drainage** 81

3.9 **Affaissement des sols organiques** 82

3.10 **Contamination des sols** 83

3.11 **Synthèse de l'impact économique de la dégradation des sols au Québec** 84

CHAPITRE 4

CONTROLE DE LA DÉGRADATION DES SOLS 85

4.1 **Gestion de la matière organique du sol** 88
4.1.1 Qualité des amendements organiques 88
4.1.1.1 Coefficient isohumique 88
4.1.1.2 Rapport carbone-azote (C/N) 89
4.1.1.3 Vitesse de décomposition 89
4.1.1.4 Teneur en matière sèche 90
4.1.2 Résidus de culture 90
4.1.2.1 Importances des racines comme amendement 92
4.1.2.2 Engrais verts 92
4.1.3 Apports externes 92
4.1.3.1 Fumiers 92
4.1.3.2 Copeaux de bois 94
4.1.4 Compostage de surface 96

4.2 **Rotation des cultures** 97

4.3 **Pratiques culturales** 100
4.3.1 Travail minimal du sol 100
4.3.2 Culture sans travail du sol 102
4.3.3 Culture sur billon associée aux pratiques culturales de conservation 108
4.3.4 Limite de la charge et de la circulation 111
4.3.5 Profondeur des labours et préservation de la couche arable. 111

4.4 **Contrôle de l'eau du sol** 112
4.4.1 Correctifs à apporter pour le drainage de surface 112
4.4.2 Correctifs à apporter aux problèmes de drainage souterrain 112
4.4.3 Correctifs à apporter aux cours d'eau 114

4.5 **Chaulage des sols** 115

4.6 **Pratiques anti-érosives** 117
4.6.1 Pratiques culturales 117
4.6.1.1 Cultures de couverture 117
4.6.1.2 Cultures en contrepente 117
4.6.1.3 Cultures en bandes alternées 118
4.6.2 Ouvrages de génie 119
4.6.2.1 Voies d'eau engazonnées 119
4.6.2.2 Terrasses 121
4.6.2.3 Brise-vent 123

4.7 **Problèmes particuliers aux sols organiques** 125
4.7.1 Contrôle de la nappe phréatique 125
4.7.2 Irrigation de surface 125
4.7.3 Inhibiteurs de l'activité enzymatique 125
4.7.4 Apport de sol minéral 126
4.7.5 Régie des pratiques culturales 126

4.8 **Contamination des sols** 127
4.8.1 Régie de l'épandage des boues 127
4.8.2 Utilisation rationnelle des pesticides 128

CHAPITRE 5

CONCLUSIONS 129

BIBLIOGRAPHIE 131

ANNEXE 1 - GLOSSAIRE 146

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1- Évolution de l'agriculture au Québec 15

Tableau 2- Superficies de quelques cultures au Québec 16

Tableau 3- Superficies des classes des sols agricoles du Québec méridional 17

Tableau 4- Teneur en C et en N pour l'ensemble des horizons A et B de même que la stabilité des agrégats de sols sous prairie et de leurs homologues cultivés 24

Tableau 5- Contenu en matière organique du sol par suite de trois façons culturales (Québec) 26

Tableau 6- Charte d'interprétation de l'humidité du sol selon diverses textures 32

Tableau 7- Relation entre le rendement des cultures et la compacité des sols 37

Tableau 8- État physique du sol et énergie requise pour le labour sous deux systèmes de culture 38

Tableau 9- Pertes de sol annuelles moyennes à Saint-Coeur-de-Marie, Cap-aux-Corbeaux et Lennoxville pour différentes cultures 42

Tableau 10- Quantités de $CaCO_3$ exigées pour neutraliser l'azote de quelques engrais chimiques 50

Tableau 11- Augmentation de l'acidité des sols occasionnée par l'utilisation des engrais chimiques azotés 51

Tableau 12- Quantités de SO_2 et NO_x émises dans l'atmosphère en 1980 aux États-Unis, au Canada et au Québec 53

Tableau 13- Composition des boues résiduaires de quelques villes ontariennes 62

Tableau 14- Analyse comparative des boues du Québec 63

Tableau 15- Concentrations maximales permissibles de métaux lourds dans les boues considérées comme acceptables pour utilisation sur des sols agricoles 65

Tableau 16- Charges maximales permissibles de métaux lourds dans les terres agricoles 66

Tableau 17- Répartition régionale des superficies consacrées à la production de maïs-grain et de maïs-fourrager en 1983 70

Tableau 18- Répartition régionale des superficies consacrées à la production de pomme de terre, légumes et foin (1981) 71

Tableau 19- Répartition régionale des superficies consacrées à la production de céréales (1981) 71

Tableau 20- Aperçu du contenu des sols du Québec en matière organique selon les régions 72

Tableau 21- Coût estimatif de la compaction des sols au Québec ... 75

Tableau 22- Estimation spéculative du coût de l'érosion hydrique au Québec dans les régions agricoles présentant une physiographie défavorable associée aux pentes raides ou au relief vallonneux 77

Tableau 23- Sensibilité des sols aux précipitations acides 80

Tableau 24- Changement de niveau des sols observé à certains sites cultivés et boisés dans le Sud-ouest du Québec, de 1975 à 1978 82

Tableau 25- Estimation du coût annuel direct (minimum et maximum) de la dégradation des sols au Canada 84

Tableau 26- Résumé des principales méthodes de lutte pour freiner ou prévenir la dégradation des sols 87

Tableau 27- Matière organique résiduelle produite par l'addition au sol de divers amendements organiques et âge initial apparent 89

Tableau 28- Contenu en matière sèche des fumiers et lisiers 91

Tableau 29- Quantité d'humus produite à l'hectare par les résidus de diverses cultures selon le rendement des récoltes 93

Tableau 30- Effet de 20,2 t/ha de fumier, appliquées tous les 2 ans sur une culture de mélilot, sur la grosseur des agrégats stables à l'eau (Michigan) 94

Tableau 31- Effet des apports de copeaux et de lisier sur la teneur en matière organique et le rapport C/N du sol 96

Tableau 32- Stabilité des agrégats par suite de quatre traitements avec du seigle d'automne (New-Jersey) 98

Tableau 33- Effets de la rotation des cultures sur la teneur en matière organique et la stabilité des agrégats d'un loam sur une période de 10 ans 98

Tableau 34- Efficacité d'une rotation des cultures sur les pertes de sol et le ruissellement 99

Tableau 35- Diamètre moyen après tamisage des agrégats, 5e année (Loam limoneux Neubois) (Assolement de 6 ans) 102

Tableau 36 - Effets de deux pratiques culturales (semis direct et labour) et de quatre niveaux de fertilisation azotée sur le contenu en matière organique du sol sur le loam limoneux Maury, Kentucky, durant cinq années de monoculture de maïs 103

Tableau 37 -Effets de deux années de préparation du sol sur la stabilité des agrégats du sol par suite d'un test d'impact de 200 gouttes d'eau 104

Tableau 38- Effets de pratiques culturales sur la masse des racines de maïs par unité de volume à diverses profondeurs 104

Tableau 39- Effets de quatre pratiques culturales sur la longueur des racines de maïs dans la couche arable, au cours de la 5e année sur un loam limono-argileux Nicollet 106

Tableau 40- Ruissellement, pertes de sol et effet sur le rendement d'une culture de maïs implantée en semis direct ou après labour et hersage (Lennoxville) 107

Tableau 41- Influence des types de travail du sol sur la température du sol après le semis (Wisconsin) 109

Tableau 42- Profil de densité apparente de la couche arable d'un loam argileux Neubois en monoculture de maïs-fourrager depuis 6 ans 109

Tableau 43- Rendement du maïs fourrager selon différentes pratiques culturales 110

Tableau 44- Influence de la profondeur du labour sur le rendement du maïs-grain en sol argileux Brookston (moyenne de 7 ans) (Ontario) 110

Tableay 45- Matériaux calcaires 116

Tableau 46- Pouvoir neutralisant de différents matériaux de chaulage et leur équivalent $CaCO_3$ 116

Tableau 47- Largeur des bandes recommandées en fonction de la texture du sol 118

Tableau 48- Influence du sens des labours sur la perte de sol 119

Tableau 49- Espèces recommandées au Québec et taux de semis pour la protection des voies d'eau 120

LISTE DES FIGURES

Figure 1- Interactions entre les pratiques culturales conduisant à la dégradation des sols et leurs impacts 21

Figure 2- Relation entre le diamètre moyen des agrégats et la teneur de 26 sols en matière organique 23

Figure 3- Relation entre la texture et la teneur en matière organique de 170 sols du Québec cultivés et sous prairies 23

Figure 4- Influence de la teneur en eau et de la texture sur les possibilités de travail du sol 30

Figure 5- Rendement en matière sèche de diverses cultures en fonction de la densité apparente d'un sol argileux 35

Figure 6- Carte d'isocourbes de pH moyens annuels en Amérique du nord pour l'année 1982 52

Figure 7- Effet sur le carbone du sol de l'application de 45 t/ha/an de fumier de bovin pendant 4 ans 95

Figure 8- Adaptation des façons culturales réduites en fonction du type de sol (recommandation Ontario) 101

Figure 9- Évolution de la porosité totale du sol de la couche arable (0-15 cm) selon que la façon culturale primaire est le labour ou le chisel sur une période de 9 ans (loam limono-argileux Nicollet) 105

Figure 10- Types de terrasses 122

CHAPITRE 1

Problématique de la dégradation des sols

La dégradation des sols se définit comme étant l'épuisement de la capacité de production de la couche arable des terres. Cette baisse de productivité résulte de modifications des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol ainsi que d'une perte de sol, de matière organique et de minéraux.

La dégradation des sols est attribuable pour une bonne part à la pression exercée sur le secteur agricole pour en accroître la productivité. De plus, les façons culturales associées aux monocultures de plantes annuelles, les semis faits dans le sens de la pente, l'utilisation de machinerie exerçant une pression élevée au sol, une fertilisation inappropriée, l'assèchement excessif des sols, le surpâturage et le déboisement contribuent aussi à la dégradation. Cependant, la qualité intrinsèque de la terre arable, l'utilisation croissante des engrais chimiques et des pesticides et l'introduction de cultivars améliorés ont probablement contribué jusqu'à présent à masquer l'envergure du problème de dégradation des sols.

Selon le Comité sénatorial permanent de l'agriculture, des pêches et des forêts (1984), l'agriculture canadienne traverse actuellement la pire crise de son histoire et, si le Canada ne prend pas sous peu les mesures qui s'imposent, il risque de perdre une partie importante de son potentiel agricole. Selon ce comité, la dégradation des sols coûte actuellement plus d'un milliard de dollars par année aux agriculteurs canadiens. Des recherches menées au Canada et aux États-Unis ont permis d'établir que l'enlèvement de 2,5 centimètres de sol arable par l'érosion peut réduire les récoltes de blé de 3,3 à 7,4 hectolitres/hectare (Comité sénatorial permanent de l'agriculture, des pêches et des forêts, 1984). Dans certains champs du Sud-ouest de l'Ontario, l'érosion sévère des sols a provoqué une baisse de rendement de 30 à 40% dans la culture du maïs (ibidem). Toujours dans cette province, les pertes reliées à l'érosion s'élèvent à 68 millions de dollars en coûts directs auxquels s'ajoutent 78 millions de dollars pour les coûts indirects (Driver et Wall, 1982). Pour les coûts directs, 40% sont attribuables à la baisse des rendements, 45% à la perte d'éléments nutritifs et 12% aux pertes de pesticides. Dans les Prairies, on estime qu'au prix de l'engrais de 1982, il en coûterait aux agriculteurs de l'Ouest, 239 millions de dollars en fertilisants pour compenser la perte annuelle de rendement en céréales occasionnée par l'érosion éolienne et hydrique (Prairie Farm Rehabilitation Administration, 1983).

La situation au Québec ne semble guère meilleure que chez nos voisins. L'évolution de l'agriculture québécoise n'est pas étrangère à la dégradation des sols. Sur une période de 30 ans, le nombre de fermes est passé de 130 000 à 48 000 (TABLEAU 1). Cette baisse est attribuable d'une part à la consolidation des petites entreprises, puisque la superficie moyenne des fermes est passée de 50,6 hectares en 1951 à 78,9 hectares en 1981, et d'autre part, à l'abandon des terres marginales et des terres situées en périphérie des centres urbains sous la pression des spéculateurs. La superficie totale des fermes est passée de 6,8 à 3,8 millions d'hectares, soit une baisse de 40%. Le nombre de travailleurs agricoles a diminué de 70% et le rapport des ouvriers agricoles sur l'ensemble des travailleurs est passé de 17,3 à 2,9%. L'indice de productivité agricole a doublé durant cette période.

TABLEAU 1 -- **Évolution de l'agriculture au Québec**

	1951	1981
Nombre de fermes	134 336	48 144
Superficie totale en culture	6 800 000 ha	3 800 000 ha
Terre améliorée	3 600 000 ha	2 400 000 ha
Nombre de travailleurs agricoles	255 000	77 000
Main-d'oeuvre agricole/ ensemble des travailleurs	17,3%	2,9%
Indice de productivité agricole (1971 = 100)	65,5	138,8

Source: Mehuys (1984).

Cette augmentation de productivité a été rendue possible par la capitalisation, la disponibilité de machines agricoles efficaces, l'installation de drainage souterrain, l'utilisation de cultivars améliorés, des applications accrues de fertilisants chimiques et de pesticides ainsi que par l'évolution des connaissances. On peut également inclure l'abandon des productions animales au profit des productions végétales spécialisées. Ainsi, les superficies en maïs ont quintuplé au cours des vingt dernières années au Québec pendant que les productions d'avoine et de foin ont diminué (TABLEAU 2). Les surfaces ensemencées en maïs-grain ont quadruplé au cours de la dernière décennie et celles consacrées au maïs fourrager ont suivi à peu près le même développement.

Le changement de cultures demande une modification des pratiques culturales. La rotation traditionnelle de 5 à 7 ans incluant plusieurs années de foin fut délaissée en faveur de la monoculture de plantes annuelles. Les champs reçoivent peu de fumier pour rehausser la fertilité et le niveau de matière organique du sol. Finalement, l'emploi de machines agricoles exerçant une pression élevée a pour effet de détruire la structure et de compacter le sol. Ces changements ont cours sur les meilleurs sols agricoles situés dans les régions climatiques les plus favorables. L'intensification et la spécialisation de l'agriculture ont donc conduit en grande partie à la dégradation des sols du Québec. Les formes prédominantes de dégradation sont: la perte de matière organique et la détérioration de la structure, la compaction, l'érosion hydrique et éolienne, l'acidification, les problèmes reliés au drainage, l'affaissement des sols organiques et la contamination des sols.

TABLEAU 2 -- **Superficies de quelques cultures au Québec**

Culture	Superficie (ha) 1972	1982	1985*
Maïs-grain	46 100	172 000	245 000
Foin	1 092 000	967 000	1 000 000
Avoine	275 000	163 000	150 000
Orge	17 000	121 000	155 000
Blé	16 000	32 000	50 000
Total, petits grains	308 000	316 000	355 000

Source: Mehuys (1984).
* Terre de Chez Nous, Janvier 1986

Trop de gens s'imaginent que le sol est une ressource inépuisable et facilement renouvelable, mais il en est tout autrement. Le sol doit être plutôt considéré comme une ressource non renouvelable à court et moyen termes puisque la formation d'une couche arable fertile et productive demande des siècles sous nos conditions climatiques. Au Québec, la question de la conservation des sols se pose d'une façon particulière en raison des ressources limitées en sols ayant un bon potentiel agricole et situées sous des conditions climatiques favorables. Un inventaire des terres du Québec méridional révèle qu'une forte proportion de ces terres fait partie de la classe 7; c'est-à-dire qu'elles n'offrent aucune possibilité pour la culture ou le pâturage permanent (TABLEAU 3); en incluant les étendues d'eau (à l'exception du Saint-Laurent, du Saguenay et du Lac Saint-Jean) et les zones urbaines, cela représente plus de 75% du territoire. Les sols ayant un potentiel agricole, classes 1 à 4, ne représentent que 16% (5,2 millions d'hectares) des terres. De ces sols, plus de la moitié sont de la classe 4 et présentent des limitations sévères à l'agriculture. Quant à ceux de classe 1 qui offrent le meilleur potentiel de production, ils ne représentent que 14 000 hectares.

La majorité des bons sols agricoles du Québec méridional se situent sur les basses terres du Saint-Laurent, soit dans les régions de Montréal, Sherbrooke, Trois-Rivières et de chaque coté du fleuve en bandes étroites vers la ville de Québec. Cette région, couvrant 2,3 millions d'hectares, regroupe plus de la moitié des sols bien adaptés à la grande culture du Québec.

TABLEAU 3 -- **Superficie des classes des sols agricoles du Québec méridional**

Classe		Superficie (ha)	(%)
1		14 000	0,0
2		1 000 000	3,1
3		1 400 000	4,3
4		2 800 000	8,7
5		1 600 000	5,0
6		9 000	0,0
7		21 600 000	67,0
0	Sols organiques	1 250 000	3,9
	Étendues d'eau	2 500 000	7,8
	Zones urbaines	60 000	0,2

Source: Lajoie (1975) modifié

Les sols des classes 2 et 3 sont surtout des argiles marines, planes à ondulées. L'excès d'humidité et l'imperméabilité du sous-sol constituent les principales limitations. Certains sols de la classe 3 ont une faible fertilité qui s'ajoute parfois à une déficience du drainage naturel. La pierrosité et les pentes affectent une très faible proportion des sols de cette classe. Les sols de classe 4, marginaux pour les cultures sarclées, sont les plus importants des basses terres par leur étendue. Ces sols caractérisés par une faible fertilité naturelle et par un drainage déficient ou excessif, sont formés de matériaux sableux recouvrant les argiles, et sont généralement plats avec ou sans micro-relief.

Les sols organiques se retrouvent majoritairement dans la partie nord du Québec méridional, là où le climat est peu favorable à une agriculture traditionnelle. Des 120 000 hectares de sols organiques à l'intérieur des basses terres du Saint-Laurent, seulement 10 000 hectares sont présentement utilisés à des fins horticoles et cela principalement au sud-est de Montréal (Parent, 1984).

Au Québec, 90% des sols de catégorie A (classes 1 à 3) et 10% des sols de catégorie B (classe 4) ont été défrichés et utilisés en grande par-

tie pour la culture (Lajoie, 1975). L'expansion de la production agricole ne peut se faire que sur les sols sableux marginaux de la catégorie B, dont l'exploitation demande de meilleures techniques et de plus forts intrants. Cependant, il est plus économique à court terme d'augmenter la productivité des terres cultivées de catégorie A que de défricher de nouvelles terres de moindre qualité.

De plus, de grandes superficies de sols de classe A ont été perdus au profit de l'urbanisation dans la zone s'étendant de Saint-Eustache à Terrebonne, en incluant les îles de Montréal, Jésus (Laval) et Bizard. D'autre part, les centres d'habitation à faible densité localisés dans les régions rurales menacent aussi les terres agricoles. La loi sur la protection du territoire agricole, adoptée en 1978, est venue freiner en partie le gaspillage des terres. Cette loi veille à ce que personne n'utilise à des fins autres qu'agricoles ces sols sans autorisation préalable de la Commission de protection du territoire agricole (C.P.T.A.Q.).

Comme on ne peut à court terme et de façon économique mettre en valeur de nouvelles terres, il devient très important de préserver la productivité des sols actuels contre les processus de dégradation. Lors de l'établissement d'un programme de conservation du sol, la connaissance du sol et du sous-sol est essentielle. En effet, l'établissement d'un plan vise avant tout à utiliser avec le plus d'efficacité possible chaque parcelle de terrain conformément à ses possibilités d'adaptation et à ses limites tout en assurant une protection appropriée des sols. Cette décision de conserver les sols est souvent dictée par l'économie du marché des denrées agricoles.

Donc, la protection des sols agricoles n'est pas seulement la responsabilité des agriculteurs mais également celle de la société, de l'agronome et du technicien agricole, du chercheur, de l'enseignant et de l'administrateur. Les efforts de tous les professionnels de l'agriculture doivent être concertés afin de préserver cette ressource non renouvelable que constitue le sol agricole, et d'assurer pour les générations futures, la satisfaction d'un besoin fondamental, soit la production d'aliments.

CHAPITRE 2

Nature des processus de dégradation des sols

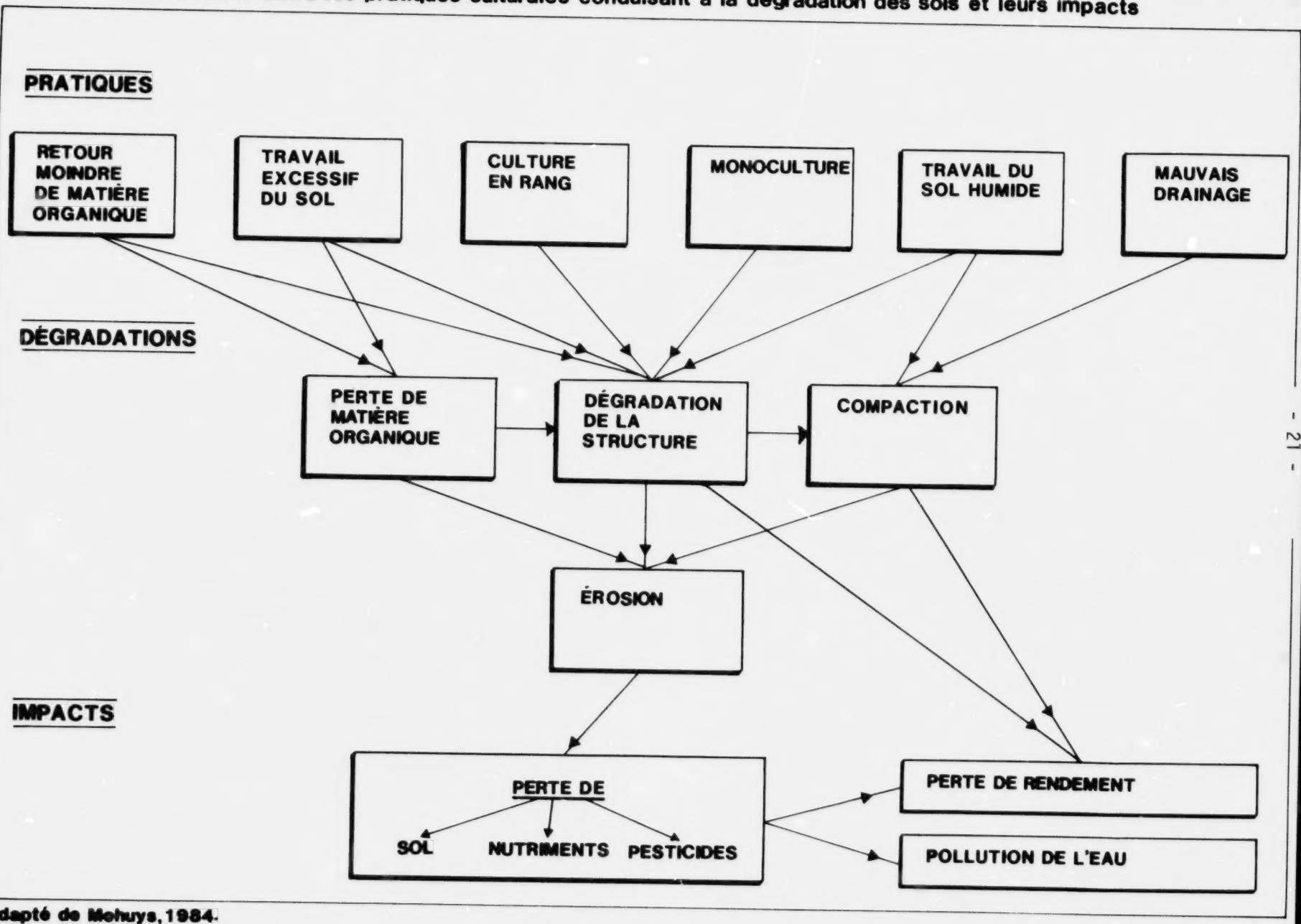
2.1 Relations entre les diverses formes de dégradation des sols

Les formes principales de dégradation des sols se manifestent rarement seules à cause des fortes relations qui existent entre elles (FIGURE 1). La perte de matière organique, suite à l'intensification des cultures est sans aucun doute à la base de nombre de problèmes reliés à la dégradation des sols. Le travail excessif du sol et la monoculture en rangée ne font qu'accentuer la perte de matière organique et la dégradation de la structure. L'utilisation de machines de plus en plus lourdes et puissantes permet de travailler le sol dans des conditions défavorables au maintien d'une structure appropriée. Les pratiques agricoles contribuant à la perte de matière organique et à la détérioration de la structure favorisent la compaction. La résultante de ces trois processus de dégradation est la perte de sol, de nutriments et de pesticides par l'érosion hydrique sur sol en pente et de façon moindre par l'érosion éolienne, sans oublier la perte de productivité des sols et la pollution des eaux. La perte de sol est sans aucun doute la conséquence la plus néfaste pour l'agriculture. Au point de vue agronomique on considère qu'une perte annuelle variant de 2 à 5 tonnes/hectare, selon le type de sol, ne compromet pas la productivité future des terres, puisque le taux moyen de formation des sols est du même ordre de grandeur (Mehuys et Kerby, 1986). Toutefois, on a observé sous des conditions spécifiques, des pertes annuelles de 10, 20, 30 et même 50 tonnes/hectare (Dubé, 1975).

L'acidification des sols, l'affaissement des sols organiques et la contamination des sols, sont d'autres formes importantes de dégradation relevant de processus différents.

La dégradation résulte donc la plupart du temps de l'utilisation de mauvaises pratiques culturales ou d'un choix inapproprié des cultures ou d'une méconnaissance des sols associés aux monocultures en rang. Quoi qu'il en soit, la relation matière organique-structure demeure à la base de nombreuses formes de dégradation des sols minéraux.

FIGURE 1 **Interactions entre les pratiques culturales conduisant à la dégradation des sols et leurs impacts**



Adapté de Mehuys, 1984.

2.2 La matière organique

2.2.1 Définition

La matière organique du sol est l'ensemble des substances carbonées provenant des débris végétaux et animaux du sol. Ces résidus, constamment transformés par l'action des organismes du sol, se divisent en deux catégories de produit, selon l'état de décomposition de la matière organique:

1. La matière organique fraîche ou peu transformée est non liée aux constituants minéraux. De rapport carbone/azote (C/N) supérieur à 15, elle favorise une activité microbienne intense et évolue rapidement dans le sol.

2. L'humus stable ou matière organique transformée provenant de la décomposition de l'humus jeune est lié aux particules minérales du sol. De couleur foncée, cette matière organique est lentement minéralisée par l'action microbienne et possède un rapport C/N voisin de 9 à 10 si le sol est biologiquement actif, par suite des conditions de drainage et d'acidité appropriées. Les acides humiques et fulviques, et les humines, en sont les principaux constituants.

2.2.2 Rôle de la matière organique

La matière organique joue un rôle dominant dans les processus d'agrégation et de stabilisation de la structure (Allison, 1973). Cette dernière s'élève avec le contenu en matière organique du sol (FIGURE 2). Ce sont les substances humiques qui servent de "ciment" entre les particules minérales, soit directement par des liens entre leurs charges positives et les charges négatives des colloïdes minéraux, soit par l'intermédiaire de cations comme le Ca^{+2}, Fe^{+3} ou Al^{+3}. La matière organique élève la capacité d'échange cationique (C.E.C.) des sols et en diminue la densité apparente en diluant directement la matrice du sol par l'ajout d'un matériau moins dense ou indirectement par l'amélioration de la stabilité des agrégats (MacRae et Mehuys, 1985).

La matière organique augmente parfois la capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs, et sert de support à la vie microbienne en agissant comme source d'énergie. Elle rehausse la fertilité du sol en libérant principalement de l'azote et des oligo-éléments nécessaires à la croissance des plantes. Ainsi, dans les sols pauvres en matière organique, il en coûte davantage pour maintenir les rendements par l'apport d'azote minéral car la minéralisation de l'humus ne produit pas suffisamment d'azote inorganique.

FIGURE 2 **Relation entre la stabilité des agrégats (DMP) et la teneur de 26 sols en matière organique**

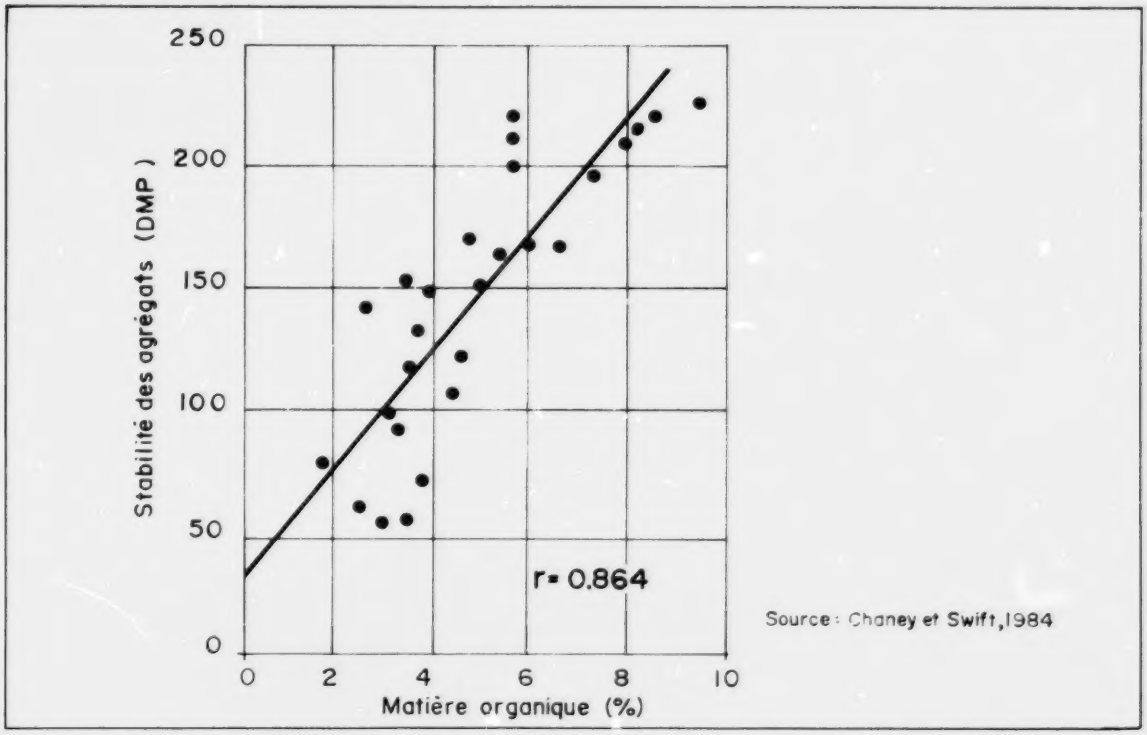
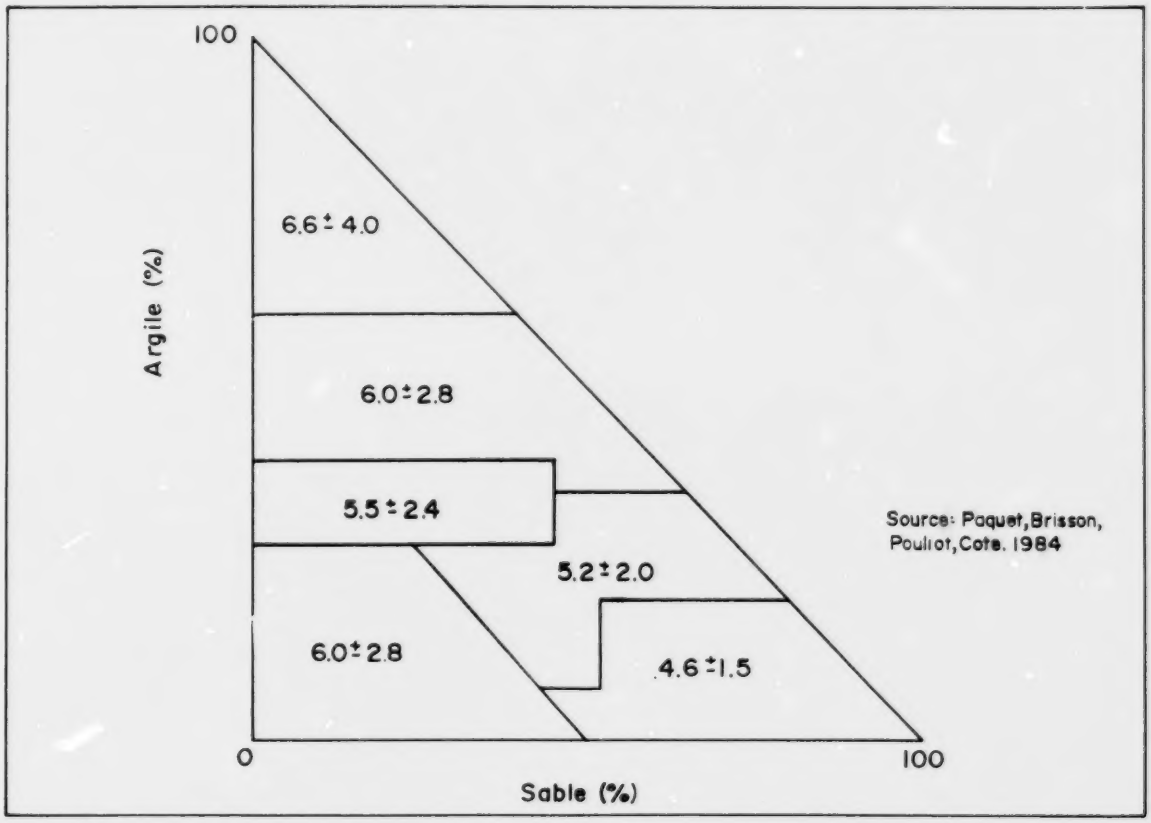


FIGURE 3 **Relation entre texture et teneur en matière organique (%) de 170 sols du Québec cultivés**



2.2.3 Niveau d'équilibre de la matière organique dans les sols cultivés

Il existe, dans les sols à l'état vierge sous couvert forestier, un niveau d'équilibre de la matière organique. Dès qu'un sol est défriché, labouré et travaillé, le contenu du sol en matière organique tend vers un nouvel équilibre, inférieur ou supérieur à celui qui caractérisait le sol vierge. La quantité de matière organique à l'équilibre dans un sol cultivé dépend du taux de transformation de l'humus par les organismes du sol.

Le niveau d'équilibre humique dépend également de la texture du sol. Sörenson (1967) a démontré que l'argile possède une grande capacité d'absorption des substances humiques nouvellement formées et principalement des acides aminés. La matière organique en décomposition forme alors des substances humiques mieux absorbées et protégées contre la décomposition microbienne dans les sols plus riches en argile. La figure 3 démontre la relation entre la texture et la teneur en matière organique de 170 sols du Québec. Le contenu en matière organique décroît sensiblement des sols argileux vers les sols sableux.

La mise en culture influence le niveau de matière organique de même que la stabilité structurale des sols. Des pertes de carbone variant de 30 à 35% et de 8 à 31% en azote par rapport au niveau initial, ainsi qu'une diminution des agrégats stables à l'eau de 55 à 82%, ont été observées sur les sols sableux et argileux cultivés des fermes laitières suivant une rotation céréale-foin (Martel et Deschênes, 1976) (TABLEAU 4). Pour des systèmes de monoculture de plantes annuelles, les pertes de matière organique peuvent atteindre 60% (Martel et MacKenzie, 1980).

TABLEAU 4 -- **Teneur en C et en N pour l'ensemble des horizons A et B de même que la stabilité des agrégats de sols sous prairie et de leurs homologues cultivés**

Sol	Culture	C (t/ha)	N (t/ha)	Stabilité des agrégats,%	
				Air	Eau
Kamouraska	Prairie	305	8,9	48	32,0
	cultivée	205	8,2	42	6,0
	(Pertes)	(33%)	(8%)	(13%)	(82%)
Charlevoix	Prairie	203	7,7	8	5,5
	cultivée	143	5,3	4	2,5
	(Pertes)	(30%)	(31%)	(50%)	(55%)
Greensboro	Prairie	155	6,0	19	11,0
	cultivée	100	4,7	18	5,0
	(Pertes)	(35%)	(21%)	(5%)	(55%)

Source: Martel et Deschênes (1976)

2.2.4 Perte de matières organiques occasionnée par la culture

Le maintien d'un niveau élevé de matière organique demeure une priorité constante, vu ses rôles prépondérants sur la productivité et les propriétés physiques et chimiques du sol. Cependant, la culture intensive des terres accélère la destruction de l'humus des sols.

On attribue aux labours fréquents et aux hersages excessifs la diminution de près de 50% de la teneur en matière organique du sol (Comité sénatorial permanent de l'agriculture, de pêches et des forêts, 1984). De plus, l'absence de graminées et de légumineuses dans la rotation ne fait qu'accentuer la perte d'humus des sols. Ces conditions sont généralement associées aux cultures de plantes sarclées (maïs, pomme de terre, légume, betterave sucrière, tabac, etc.) qui sont toutes pratiquées selon des façons culturales excessives favorisant l'oxydation de la matière organique tout en limitant le retour de résidus organiques au sol sauf dans le cas du maïs-grain. Le travail excessif, les engrais minéraux, le chaulage et le drainage accélèrent la minéralisation de l'humus en favorisant l'activité microbienne des sols.

Tous les travaux qui déplacent ou mêlent les horizons superficiels avec les horizons inférieurs comme la formation des planches, le nivelage des monticules de terre, l'abaissement et l'aplanissement des côtes et le labour profond ont comme conséquence la dilution de la matière organique totale du sol. Le tableau 5 démontre l'effet des labours sur la distribution de la matière organique dans le profil du sol.

2.2.5 Dynamique de la dégradation de la matière organique

La matière organique n'évolue pas de façon constante au cours du temps. Il a été démontré que les taux de perte en C et N sont les plus rapides au cours des 10 à 20 premières années suivant la mise en culture des champs (Martel et Paul, 1974; Groenevelt et al., 1984). Ainsi, d'après certaines données recueillies en Saskatchewan, la perte annuelle nette d'azote organique sur sol chernozémique a été de 1,60% au cours des 14 premières années de culture, de 1,10% pour la période de 15 à 35 ans et de 0,35% pour la période de 36 à 60 ans (Campbell et al., 1976).

TABLEAU 5 -- **Contenu en matière organique du sol par suite de trois façons culturales (Québec)**

	1 an après les façons culturales				4 ans après les façons culturales			
Profondeur (cm)	18	32	52	72	10	30	50	70
Traitements	%							
T1	4,84	2,40	1,59	0,63	5,59	2,99	1,47	0,66
T2	4,83	1,75	0,99	0,51	6,17	3,36	0,99	0,52
T3	2,60	2,94	2,20	1,95	2,62	2,15	1,76	1,34

Source: Côté et Dupuis (1980).

T1: Labour avec charrue à versoir à 20 cm de profondeur.
T2: Sous-solage à 70 cm de profondeur.
T3: Labour à 70 cm de profondeur.

2.3 Structure des sols

2.3.1 Définition

La structure du sol se définit comme étant le mode d'assemblage des particules minérales et organiques en agrégats, granules et peds de formes et de tailles variables. C'est un état qui peut évoluer avec le temps. Une bonne structure pour la croissance des plantes doit comporter des agrégats relativement stables dans l'eau, des agrégats de formes et tailles variables qui déterminent le volume des vides et l'organisation d'un système poreux bien développé et continu indispensable à l'aération du sol, à l'évacuation des surplus d'eau et au développement des racines. C'est l'humus bien décomposé du sol qui stabilise la structure sous notre climat et qui forme avec l'argile un complexe générateur d'agrégats stables.

Une coupe dans un profil cultural révèle un ou plusieurs modèles d'assemblage des matériaux du sol. En grattant à l'aide d'une pointe ou d'un couteau dans le profil, les agrégats, la terre fine, le gravier, les pierres et les racines se détachent; ce sont les éléments constituants de la structure. Une structure se décrit par la forme et les dimensions de ses unités structurales et des espaces inter-structuraux, par la dureté des ciments, et par la stabilité des éléments structuraux soumis à des stress de mouillage et de séchage, de cisaillement, de compression, de gel et dégel, etc.

Les sols vierges atteignent généralement un niveau stabilisé de structure en équilibre avec les facteurs climatiques, édaphiques, hydrologiques et botaniques qui y prévalent. Leur mise en culture, après assainissement, épierrement, modelage et façons culturales profondes, vient rompre cet équilibre. En plus, la culture expose le sol à de nouvelles contraintes telles que l'absence de litière, le brassage répété de la couche arable, le compactage par les machines, une plus grande exposition aux écarts climatiques, les apports d'amendements et de fertilisants. L'activité de la microfaune et de la microflore du sol contribue au renouvellement de la structure, tout en subissant elles aussi ces contraintes.

Il n'existe pas pour les sols cultivés un modèle de structure idéal et unique. Ce sont plutôt les effets déterminants de différents types de structure sur la remontée capillaire de l'eau, la conductivité hydraulique, la rétention en eau utile, la pénétration des racines, l'aération, la résistance du sol à la compression, la cohérence et le niveau d'adhérence aux outils de travail qui sont considérés. Dans un même profil cultural, la structure recherchée dans la partie supérieure du lit de semence peut être très différente de celle située juste en-dessous. En règle générale, les sols possédant une prédominance de particules de texture limoneuse et argileuse offrent un potentiel de production agricole croissant dans le même sens que leur développement structural. Cependant, une abondance de matériaux organiques partiellement humifiés peut suppléer à une absence d'organisation structurale des particules minérales dans un sol et leur conférer tout de même des propriétés physiques et mécaniques favorables à la croissance des plantes.

2.3.2 Développement ou dégradation de la structure

Les pratiques culturales devraient généralement contribuer à améliorer une structure peu évoluée en agissant positivement sur les facteurs naturels de formation et de stabilisation des agrégats comme les racines, les résidus organiques, les amendements, l'assainissement et le couvert végétal.

La dégradation de la structure résulte principalement des effets mécaniques de cisaillement et de compression imposés directement au sol par les instruments aratoires et par la disparition des facteurs favorables à la formation et à la stabilisation des agrégats. Un choix judicieux ou inadéquat de pratiques culturales enclenchera un processus de conservation ou de destruction de la structure.

2.3.3 Symptômes de l'affaiblissement de la structure

Les sols dont la structure est dégradée ont une densité apparente élevée et une consistance compacte et massive. La mesure de la densité apparente pour déceler une dégradation structurale, doit tenir compte du contenu en humidité du sol. Un sol argileux ou limono-argileux, dont la structure est dégradée, se contracte en blocs massifs dont la densité apparente peut passer de 1,2 tonne par mètre cube à la capacité au champs, à 1,9 tonne par mètre cube au point de flétrissement. Pour sa part, le même sol structuré voit ses agrégats se contracter individuellement lors d'un assèchement poussé tout en laissant le sol cohérent et très poreux. La capacité d'infiltration du sol compacté diminue, l'eau séjourne en surface et une croûte de battance se forme lors des pluies de forte intensité. La matière organique se minéralise lentement à cause d'une faible activité biologique de la faune et de la flore du sol. Les résidus de culture sont peu décomposés d'un labour à l'autre. Ces sols exigent également plus d'énergie pour effectuer les façons culturales, tant en période humide qu'en période sèche. Le sol adhère plus aux socs des instruments de travail du sol. Il est aussi plus cohérent donc plus difficile à fracturer par les instruments de travail du sol. Finalement, l'agriculteur observe des rendements décroissants malgré l'emploi de cultivars de plus en plus productifs et l'application accrue de fertilisants et d'amendements.

2.3.4 Facteurs aggravant la détérioration de la structure du sol

Un excès d'humidité diminue la stabilité structurale du sol. Lorsqu'il est gorgé d'eau et que cette saturation se prolonge, les fissures séparant les agrégats se ressoudent suite au gonflement des colloïdes. L'écartement des micelles qui tendent à reformer avec l'eau un mélange homogène, favorise la dispersion des colloïdes. Leur cohésion diminue et les éléments fins qui se détachent colmatent les pores du sol. Dans les deux cas, la structure qui était fragmentaire ou grumeleuse devient compacte. L'excès d'eau accélère également la décalcification du sol. Dans les sols détrempés, les ions Ca^{++} s'éloignent du complexe argilo- humique et sont remplacés par des ions H^{+}. Ainsi décalcifié, le complexe se disperse, et

rend la structure plus instable et plus compacte. Alors l'application sur un sol humide d'une pression élevée par les machines ou par le piétinement du bétail accélère la dégradation de la structure du sol en écrasant les agrégats devenus plastiques. Les agrégats ainsi écrasés durcissent en s'asséchant, créant des couches de structure compacte.

Le choix de cultivars exigeants au point de vue climatique oblige le producteur à travailler le sol sous des conditions défavorables d'humidité. Souvent les semis se font trop hâtivement sur un sol insuffisamment ressuyé, et les récoltes se font trop tardivement sur un sol humide et parfois même dans la boue. C'est le cas du maïs-grain et de la betterave sucrière dans le centre du Québec, des céréales et du maïs fourrager dans les régions périphériques. De plus l'application des engrais au stade optimal de croissance de la plante se fait souvent sans considération de l'état d'humidité du sol.

Les façons culturales primaires et les travaux excessifs de préparation des lits de semences associés principalement aux monocultures intensives en rang, concourent à la destruction de la structure et à la compaction par la pulvérisation en terre fine des agrégats du sol. A cause de l'oxydation de la matière organique de la couche arable du sol et sa dilution par les labours profonds, les agrégats des sols qui en sont dépourvus, ne résistent pas aux déformations mécaniques ou à la battance, rendant ainsi le sol plus sensible à la compaction par la machinerie.

2.3.5 Rôle des vers de terre sur le développement de la structure

Les vers de terre granulent le sol en l'ingérant et en l'agglomérant à des matières organiques. Leur population varie de moins de 100 au mètre carré dans les sols peu amendés, à plus de 1000 dans des sols recevant d'abondants apports organiques, soit un poids en vers de terre de moins de 500 à plus de 5 000 kilogrammes/hectare (Soltner, 1982). Les vers de terre participent à la décomposition de la matière organique en fragmentant et en conditionnant les débris végétaux dans leur tube digestif où s'associent l'argile et l'humus en un complexe qui stabilise les agrégats. Une population normale de vers de terre parvient durant une période de 10 ans à mélanger tout le sol compris dans les 10 premiers centimètres de surface d'une prairie (Soltner, 1982). Les vers de terre transportent la matière organique, les bactéries et les champignons à travers tout le profil. Les galeries verticales et horizontales qu'ils pratiquent accélèrent le drainage et l'aération du sol.

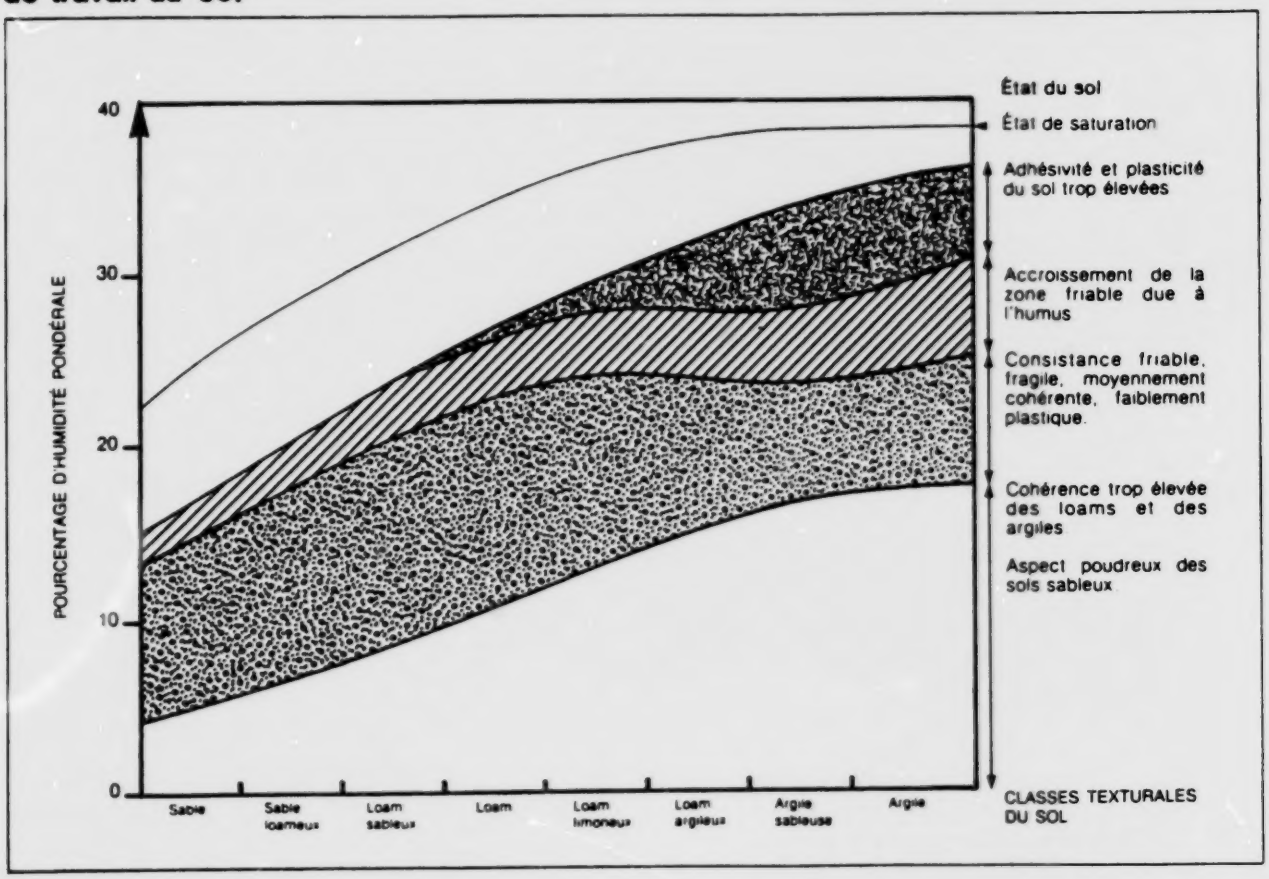
2.3.6 Action du gel sur la structure

Le gel hivernal contribue à réduire la densité d'un sol rendu compact en automne par les machineries opérant sur des sols trop humides. L'action du gel sur la structure varie avec l'humidité et l'état de division du sol (Soltner, 1982). En se cristallisant d'abord en surface, la glace fait remonter l'eau des couches profondes. En sol humide où il y a production importante de cristaux de glace, le soulèvement du sol est d'autant

plus important que celui-ci est meuble. Par contre, en sol bien ressuyé, la formation réduite de cristaux de glace provoque l'accroissement du nombre de petites fissures.

L'effet bénéfique ou nuisible du gel sur la structure apparaît au dégel (Soltner, 1982). Si le temps est pluvieux lors du dégel et si le sol se draine mal, l'eau accumulée en surface fait reprendre en masse compacte la terre fine et les agrégats que le gel avait divisé. Si au contraire le sol se draine bien, le dégel ne purra annuler l'effet bénéfique du gel même par temps pluvieux. Bref, le gel améliore la structure des sols compacté que si un bon drainage et surtout une structure en grosses mottes limitent la remontée de l'eau lors du gel et en favorisent l'écoulement rapide lors du dégel. Cependant, le gel a pur effet de réduire la dimension des agrégats qui composent la structure du sol.

FIGURE 4 **Influence de la teneur en eau et de la texture sur les possibilités de travail du sol**



Source: Coté, 1982

2.3.7 Travail du sol en rapport avec le contenu en humidité et la structure

Le sol devrait être travaillé au moment où le contenu en eau est favorable à la conservation de ses propriétés physiques. Cette humidité favorable varie en fonction de la texture du sol (FIGURE 4). Cependant, la présence de matière organique permet de travailler le sol dans des conditions d'humidité supérieures.

Le travail d'un sol trop sec avec des instruments à dents produit de gros fragments car les forces de cohésion qui lient les particules de sol entre elles sont d'autant plus fortes que l'humidité est basse. Par contre, les instruments à disques ou animés produisent un excès de terre pulvérulente.

Le travail d'un sol trop humide est très dommageable. Les sols collants et plastiques se déforment et se compactent facilement lors du passage des instruments aratoires. La structure devient massive et imperméable. L'adhérence aux pièces travaillantes des instruments de culture s'amplifie, l'effort de traction s'accroît et les mottes, au lieu de se briser, se déforment et se compriment. Enfin, un sol travaillé à sa limite de liquidité et qui est étalé en surface forme une croûte en séchant.

Il n'existe toutefois pas d'instrument précis et bon marché pouvant mesurer rapidement les conditions d'humidité acceptables pour le travail du sol par l'agriculteur. Par contre, la réaction du sol au toucher conjuguée à l'expérience de l'agriculteur, lui permet de prendre une décision éclairée quant à la possibilité de travailler ou non le sol (TABLEAU 6).

TABLEAU 6 -- **Charte d'interprétation de l'humidité du sol selon diverses textures**

Ru (%)	Texture			
	sable	sable loameux et loam sableux	loams et loams argileux	argile
0	grains individuels secs filent entre les doigts	grains secs filent entre les doigts	sec poudreux, des petites croûtes se brisent pour former un matériel poudreux	dur, apparence de terre cuite et craquelée
moins de 50%	apparaît sec, ne forme pas une boule, lorsque pressé dans la main		quelque peu granulaire, forme une boule lorsque pessée dans la main	un peu maléable, forme une boule lorsque pressée dans la main
50-75%		forme une boule lorsque pressée dans la main mais qui s'effrite par la suite	une fois pressé devient légèrement plastique, glisse un peu sous la pression des doigts, forme une boule	forme une boule ou un rouleau entre les doigts
de 75% à la capacité au champ	particules de sol adhèrent entre elles, peuvent former des boules instables lorsque pressées	forme une boule qui se brise très facilement, ne glisse par entre les doigts	forme une boule très maléable, glisse facilement entre les doigts	forme facilement un rouleau entre les doigts, doux et glissant au toucher
capacité au champ*	Lorsque pressé, aucune eau libre n'apparaît sur le sol mais les empreintes humides d'une boule pressée dans la main apparaissent sur cette dernière.			

Ru: Réserve en eau utile à la plante
* La réserve en eau utile à la plante peut être ramenée sur une base d'humidité pondérale. Ainsi à la capacité en champ, elle varie de 12 à 15% pour les sables et sables loameux, de 15 à 18% pour les loams sableux, de 20 à 35% pour les loams et loams argileux et de 30 à 35% pour les argiles.
Source: Coté (1982b)

2.4 **Compaction du sol**

La compaction est l'augmentation de la densité apparente du sol résultant de l'application d'une pression externe. Même en l'absence de contraintes mécaniques, le sol se tasse naturellement par l'action des pluies ou par la réorganisation des agrégats et des particules élémentaires plus ou moins liés sous leur propre poids.

Cependant, la compaction devient un problème préoccupant car les interventions mécaniques répétées avec des machines de plus en plus lourdes exerçant une pression élevée sur les sols fragiles et dans des conditions d'humidité excessive, tendent à faire baisser les rendements de façon significative. Selon Mehuys (1984), la compaction du sol est le problème majeur de dégradation des sols au Québec.

2.4.1 Symptômes de compaction du sol

Les symptômes observés le plus fréquemment sur les végétaux sont le retard à l'émergence, la variation dans la taille des plants, la décoloration des feuilles, le peu de profondeur et de développement ainsi que les malformations du système radiculaire. Les symptômes associés au sol sont semblables à ceux de la détérioration de la structure. En plus, il y a présence de zones compactes sous la surface du sol et des risques accrus d'érosion par l'eau. Ces symptômes se remarquent facilement lorsque les conditions de compaction sont extrêmes. D'autre part, l'interprétation de ces symptômes doit être faite avec soin car il existe des signes similaires associés à d'autres problèmes, par exemple à des carences minérales.

2.4.2 Facteurs aggravant la compaction

Sous les passages répétés de machines agricoles exerçant une pression élevée au sol, la densité du sol augmente car les particules solides poussées les unes vers les autres occupent un espace plus restreint. Cette augmentation de densité peut également provenir du piétinement des bêtes. Le contenu en eau du sol au moment de l'application des charges détermine le degré de compactage. Un sol sec, peu importe sa texture, résiste très bien à l'application de charges élevées car les forces d'attraction qui existent entre les particules d'argile sont élevées. Un sol gorgé d'eau se tasse également très peu compte tenu de sa capacité portante trop faible. Au lieu de comprimer le sol sous ses roues, le tracteur a plutôt tendance à déraper et à s'enfoncer. La traction sur le sol est alors très faible ou nulle. Par contre, un sol plastique et humide est très sensible à la compaction. L'épaississement du film d'eau qui entoure les particules d'argile contribue à diminuer la force d'attraction entre les particules. L'eau, en agissant comme lubrifiant, réduit le frottement entre les particules et permet ainsi une nouvelle répartition des grains et une augmentation de la densité apparente. Le risque de compaction s'accroît avec le contenu en humidité pour atteindre un maximum lorsqu'environ 80% des pores sont remplis d'eau.

Il est difficile de déterminer des valeurs numériques acceptables pour chacun des facteurs aggravant la compaction des sols car trop de causes

interviennent simultanément. De plus, aucune technique satisfaisante ne permet de mesurer ces facteurs rapidement.

2.4.3 Effets de la compaction des sols sur les cultures et le sol

2.4.3.1 Effets sur la germination et la levée des plantes

Un certain niveau de compaction s'avère utile pour assurer un bon contact entre le sol et la semence. Par contre, au delà d'une certaine limite, la compaction devient néfaste. La germination et la croissance initiale des plantes ne peuvent alors évaluer normalement à cause du manque d'aération, de la dureté du sol et d'une température basse. Selon Rickey et al. (1977) la croissance du maïs peut être retardée quand le volume des pores remplis d'air à la capacité au champ est inférieur à 10%.

2.4.3.2 Effets sur le système radiculaire

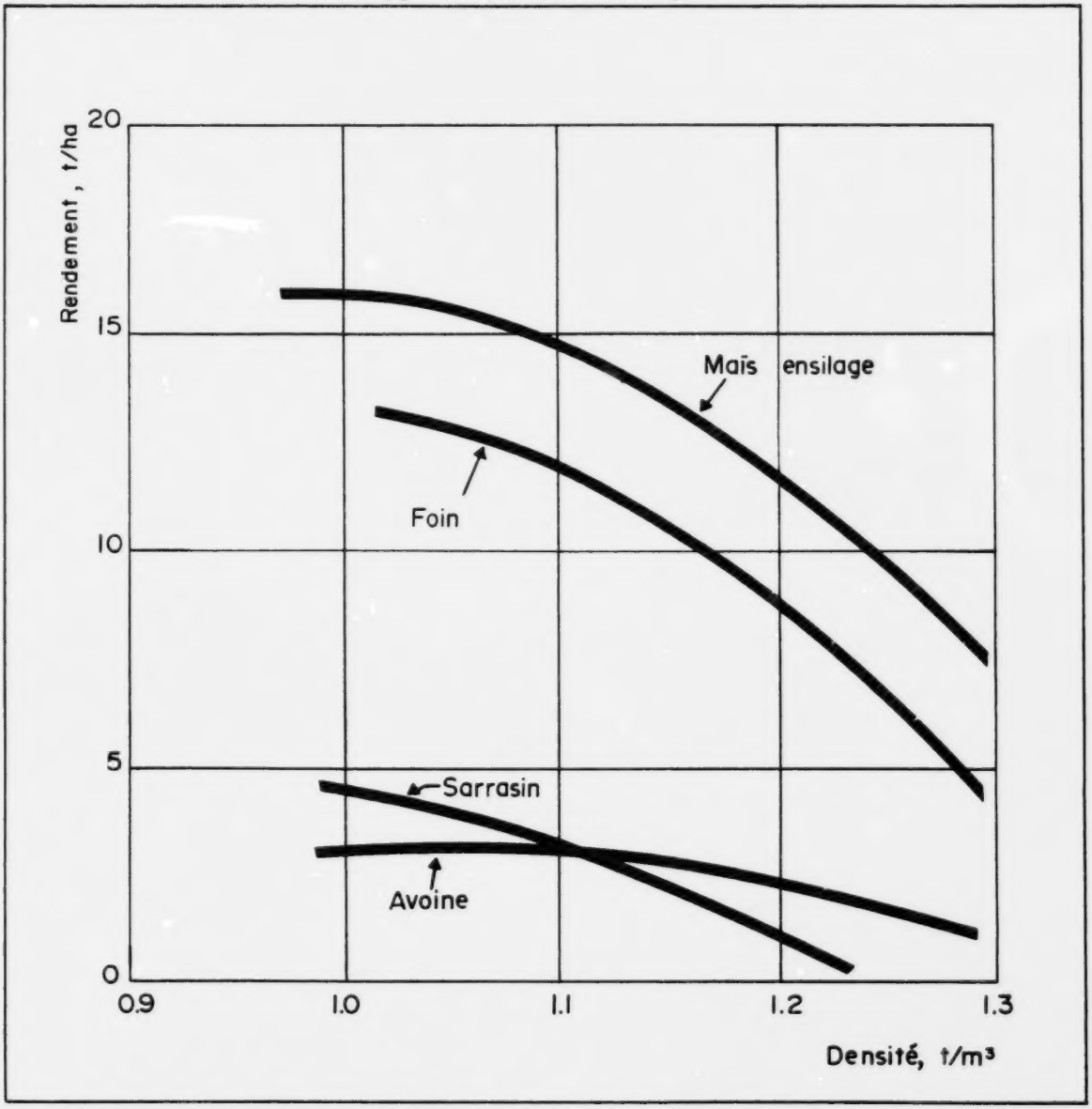
Dans un sol compact, on note une réduction du système radiculaire par une diminution de la longueur des racines, de leur ramification, de leur volume et de leur poids. Des observations sur des cultures de maïs en Ontario ont démontré une absence de racines secondaires dans les 20 premiers centimètres d'un sol fortement comprimé par les machines agricoles (Nelson et Miller, 1980).

L'anatomie des racines peut même subir des transformations. Baligar et al. (1975) ont démontré que les racines de soja n'avaient plus une surface plane et que la plupart des cellules épidermiques étaient brisées. Les cellules du parenchyme cortical montraient une forme plus sphérique, le nombre des espaces intercellulaires augmentait et les vaisseaux avaient une section plus ovale que dans les plantes croissant dans un sol non compact.

2.4.3.3 Effets sur la nutrition minérale et l'absorption de l'eau

Une diminution du système radiculaire réduit le volume de sol occupé par les racines, d'où une diminution de la capacité d'absorption en eau et en éléments nutritifs. Les plantes deviennent plus sensibles à un stress hydrique lors de conditions de sécheresse. L'absorption des éléments nutritifs majeurs, N,P,K diminue avec l'augmentation de la densité du sol. Des études sur le blé ont démontré que le contenu en matière sèche des racines, du grain et ainsi que les teneurs de la plante en N,P,K diminuaient au fur et à mesure que la densité s'élevait (Sharma et Verna, 1971). Une fertilisation accrue en éléments majeurs ne suffit plus à compenser la baisse de rendement.

FIGURE 5 **Rendement en matière sèche de diverses cultures en fonction de la densité apparente d'un sol argileux**



Mehuys et McKyes, 1985

2.4.3.4 Effets sur le rendement des récoltes

Sous des conditions normales, les rendements croissent avec l'augmentation de la densité apparente du sol pour atteindre un maximum, fonction de la nature du sol, de sa texture, de sa structure et du contenu en matière organique, mais aussi de la culture et de la variété. Le tableau 7 fait ressortir qu'il existe une densité optimale pour chaque type de plante. Passé cet optimum, les rendements décroissent plus ou moins rapidement avec des pertes de production en matière sèche pouvant atteindre 60% (FIGURE 5) (Raghavan et al., 1978).

Pour les sols argileux, une densité apparente variant de 1,0 à 1,1 tonne/mètre cube donne de meilleurs rendements pour la plupart des plantes. Dans les sols sableux, cette densité peut s'élever jusqu'à 1,3 ou 1,4 tonne/mètre cube (Mehuys et McKyes, 1985). D'après Veihmeyer et Hendrickson (1948), aucune plante ne donne de rendement satisfaisant pour des densités du sol supérieures à 1,9 tonne/mètre cube. L'effet le plus défavorable du compactage se situe dans la partie supérieure du profil (0-20 cm).

2.4.3.5 Effets sur le drainage

Dans les sols compacts, l'eau se draine lentement à cause d'un taux d'infiltration réduit. Si l'eau est chargée de particules fines, les pores du sol se bloquent peu à peu pour former une couche imperméable. Celà explique la présence de flaques d'eau même sur des terrains drainés souterrainement.

2.4.3.6 Effets sur la demande d'énergie

Les sols compacts requièrent plus d'énergie lors du travail du sol (TABLEAU 8). La puissance des tracteurs doit être augmentée pour utiliser avec les mêmes instruments aratoires. Dans certains cas, les producteurs doivent enlever des corps de la charrue pour être capables de labourer. La vitesse des hersages diminue car les tracteurs ne sont plus assez puissants. La préparation du sol demande un travail supplémentaire au printemps pour briser les grosses mottes de sol.

TABLEAU 7 -- **Relation entre le rendement des cultures et la compacité des sols**

Culture	Localisation de la culture	Types de sol	Expérimentation	Densité initiale du sol en place (t/m^3)	Densité maximale du sol compacté (t/m^3)	Densité donnant le meilleur rendement (t/m^3)	Rendement ou augmentation de rendement par rapport au témoin
Orge	Corée du Sud	nod.	au champ	1,20	1,70	1,20	43 q/ha, da=1,20 25 q/ha, da=1,40
Maïs-grain	France	Terre noire (56% d'argile)	au champ	0,95	1,22	0,95-1,00	32,2 q/ha, da=1,00 29,7 q/ha, da=1,11 29,7 q/ha, da=1,19 24,0 q/ha, da=1,22
Maïs-grain irrigué	France	Limoneux battant (12% d'argile)	au champ	1,66	1,77	1,66	58,8 q/ha, da=1,66 15,1 q/ha, da=1,77
Riz	URSS	Limono-sableux	Vases de végétation	1,00 à 1,05	1,45-1,55	1,45-1,55	4,58 t/ha, da=1,55 7,64 t/ha, da=1,20 6,63 t/ha, da=1,05
Luzerne	République émocratique Allemande	Sol belsique	au champ	1,60	1,60	1,60	Pour da 1,60, le rendement diminu de 20%
Soja	Corée du Sud	nod.	au champ	1,20	1,70	1,20	48 q/ha, da=1,20 16 q/ha, da=1,40 15 q/ha, da=1,70
Vesce de printemps	Yougoslavie	Smonitza	Vases de végétation	0,90	1,30	1,20	12,1 t/ha, da=1,20 7,2 t/ha, da=0,90 9,7 t/ha, da=1,30
Betterave à sucre	URSS	Chernazem lessivé	au champ	1,05	1,41	1,17	35,8 t/ha, da=1,05 42,8 t/ha, da=1,17 33,8 t/ha, da=1,29 23,9 t/ha, da=1,41
Pomme de terre	USA	nod.	Vases de végétation	1,87	1,19	1,07	Pour da=1,19 rendement est réduit de 50%

Source: Déjou et De Kimpe, (1984)

TABLEAU 8 -- **Etat physique du sol et énergie requise pour le labour sous deux systèmes de culture**

Type de sol et système de culture	Humidité de sol* (%)	Densité apparente* (t/m^3)	Energie requise au labour kw. h./ha
Loam limono-argileux Drummond			
Culture conventionnelle	27,4	1,13	8,3
Travail minimal du sol	26,5	1,06	7,4
Loam limoneux Brenton			
Culture conventionnelle	23,0	1,23	7,2
Travail minimal du sol	22,7	1,17	6,5

Source: Barnes et al. (1971).

* Avant le labour

2.4.3.7 Effets sur la matière organique

Dans les sols tassés, la matière organique se décompose lentement car les bactéries aérobies responsables de sa décomposition manquent d'oxygène. Les fumiers et les résidus de culture tendent à s'accumuler d'une année à l'autre. Une plus faible quantité d'azote est libérée par le processus de minéralisation.

2.4.4. Évaluation de la compaction

A l'heure actuelle, il n'existe aucun test scientifique simple à la portée de l'agriculteur permettant de déterminer si la densité du sol des champs affecte le rendement des cultures. Seules des observations qualitatives servent d'indicateurs du compactage.

Pour vérifier si un sol d'apparence compact l'est vraiment, il faut regarder le profil du sol en creusant plusieurs trous d'au moins 30 centimètres de profondeur à divers endroits dans le champ. L'observation de l'état de la structure (massive ou grumeleuse), l'aération du sol, le nombre, le volume et la profondeur des racines sont autant d'indices qui permettent au producteur d'évaluer l'état du sol. L'enfoncement d'une tige métallique pointue dans un sol que l'on croit compact comparativement à un endroit du même sol où il y a absence de circulation (le long d'une clôture) indique au producteur le degré de compactage de ses champs.

2.5 Érosion des sols par l'eau

L'érosion hydrique est une forme de dégradation répandue du sol, mais qui n'est pas nécessairement reconnue par le producteur. Elle se manifeste, à des degrés divers, dans toutes les provinces du Canada et sur tous les sols, suite à des pluies ou à la fonte des neiges. Au Québec, l'érosion hydrique ne constitue pas un problème majeur en raison de l'arrivée récente des cultures annuelles et des conditions climatiques modérées.

En matière d'érosion des sols, il est important de différencier l'érosion géologique de l'érosion accélérée. Le premier type est le processus normal de dégradation de la roche-mère, de formation des sols ou de leur destruction sous les conditions environnementales, tant climatiques que biologiques. Quant à l'érosion accélérée de la couche arable causée par les activités agricoles, elle est une conséquence directe de l'intervention de l'homme sur le milieu naturel tout en étant beaucoup plus importante et plus rapide que l'érosion géologique.

De façon générale, l'érosion de nos sols provient d'une régie inappropriée des eaux de ruissellement et de pratiques culturales qui ne tiennent pas compte de la nature et de la topographie du sol, d'une mauvaise gestion des résidus ainsi que des autres formes de dégradation telles la compaction et les pertes de matière organique et de structure.

2.5.1 Types d'érosion du sol

2.5.1.1 Érosion en nappe

L'érosion en nappe résulte de la dispersion des agrégats par les gouttes de pluie et du mouvement de l'eau en une mince lame à la surface du sol. Il en découle une perte relativement uniforme de sol sur une surface de terre. Ce type d'érosion est d'autant plus insidieux qu'il se décèle difficilement dans les champs.

2.5.1.2 Érosion en rigoles

L'érosion en rigoles est un processus qui se manifeste principalement sur les sols récemment cultivés. L'eau de ruissellement se concentre dans les microdépressions du terrain causées par les raies de labour et les sillons laissés par le semoir ou le planteur. Cette concentration de l'écoulement augmente le débit, la vitesse et les forces d'arrachement d'où la formation de rigoles. Ce type d'érosion prévaut tant que les rigoles creusées peuvent être réparées par le travail normal du sol.

2.5.1.3 Érosion en ravins

A mesure que le ruissellement en nappe ou en rigoles s'intensifie, l'écoulement se concentre de plus en plus dans des canaux d'évacuation, ce qui produit l'érosion par ravinement. Les ravins, de largeur variable, sont

de profondeur suffisante pour empêcher le passage de la machinerie agricole et peuvent même à l'occasion atteindre le roc.

2.5.2 Mécanisme de l'érosion hydrique

L'érosion résulte de l'impact des gouttes de pluie à la surface du sol. La force de cet impact varie en fonction de la grosseur des gouttelettes, de l'intensité et de la vitesse avec lesquelles elles frappent le sol. Les particules de sol se détachent sous le martellement des gouttes de pluie et sont amenées en suspension dans la lame d'eau à la surface du sol. Ces particules tendent à colmater les pores du sol et à former une croûte de bat tance, ce qui a pour effet de réduire la perméabilité du sol. Dès lors, l'eau commence à ruisseler et, si la pente est suffisamment forte, la vitesse de transport de l'eau accentue le processus de détachement commencé par l'impact des gouttes de pluie.

L'érosion peut aussi se produire durant les dégels au cours de l'hiver et plus particulièrement lors de la période de fonte des neiges au printemps sur les pentes dénudées de végétation. Les pertes les plus importantes ont lieu lorsque les premiers centimètres de sol dégèlent et que les couches inférieures encore gelées, empêchent l'infiltration de l'eau. Sur pente très forte (plus de 20%), la terre devient parfois tellement saturée d'eau, que la masse du terrain, devenue moins cohérente par l'eau, glisse le long de la pente. Ce phénomène spectaculaire est fréquent dans les argiles vallonnées au Saguenay-Lac-Saint-Jean (Dubé, 1975). Une étude menée sur un loam graveleux Charlevoix a permis de démontrer que cette forme d'érosion peut représenter plus de 40% de l'érosion annuelle sur sol nu et 23% sous prairie permanente (Dubé, 1975).

2.5.3 Facteurs influençant l'érosion hydrique

2.5.3.1 Intensité des précipitations

Au Québec, la précipitation annuelle varie entre 840 et 1000 millimètres, dont une contribution de plus de 35% attribuable à la neige (Pesant et al., 1980). Quant aux précipitations d'été (avril-septembre), elles peuvent atteindre plus de 450 millimètres. Des essais réalisés à Saint-Coeur de Marie ont démontré que ce n'est pas uniquement la quantité totale de précipitations qui influence le ruissellement, mais également l'intensité de la pluie. Ainsi, pour une même quantité d'eau de pluie, Dubé (1975) a observé des pertes de sol variant de 3 900 à 24 200 kilogrammes par hectare selon l'intensité de la précipitation. Ainsi, une faible précipitation qui tombe en un laps de temps très court, peut occasionner des pertes importantes de sol.

2.5.3.2 Pente du terrain

La vitesse et l'importance du ruissellement de l'eau à la surface du sol augmentent avec le degré et la longueur de la pente. Si la pente est faible, plus grande sera l'infiltration et moindre sera le ruissellement. Des essais réalisés à Ottawa durant 13 années consécutives sur des parcelles de maïs ayant des pentes de 5 et 10%, ont montré des pertes annuelles de sol de 17 700 et 37 900 kilogrammes/hectare pour des semis dans le sens de la pente (Ripley et al., 1962).

La longueur de la pente est également importante. Une pente longue produit plus de ruissellement qu'une pente de même inclinaison et plus courte. L'augmentation de la vitesse de l'eau de ruissellement sur une pente plus longue accroît aussi sa force érosive et ainsi l'érosion.

2.5.3.3 État physique du sol

Le niveau d'humidité du sol au moment de la précipitation influence le déclenchement du ruissellement. Ainsi, une longue période sans pluie retarde le ruissellement en favorisant l'augmentation de la capacité d'entreposage hydrique du sol. Cette capacité s'élève avec la profondeur de la couche arable de même qu'avec le taux d'infiltration. A l'inverse, un sol saturé en eau, ne permet pas une infiltration aussi rapide qu'un sol sec, d'où un ruissellement plus rapide et abondant dès le début de la précipitation.

La teneur des sols en matière organique influence la résistance des sols à l'érosion. Un sol bien pourvu en humus favorise la formation d'agrégats stables résistants à l'impact des gouttes de pluie et assure une infiltration plus rapide de l'eau, diminuant ainsi les risques de ruissellement. A l'inverse, un sol ayant une structure dégradée peut s'éroder même sur un terrain plat.

Les sols sableux et graveleux, à cause de leur forte infiltration, sont moins exposés à l'érosion pluviale. Le risque s'intensifie à mesure que la texture de la surface du sol devient plus fine et que son contenu en matière organique décroît. Les sols sableux fins à très fins, limoneux et argileux sont des plus sensibles à l'érosion hydrique. Les limons, éléments fins et instables, lorsque battus par les gouttes de pluie forment une croûte empêchant la levée des plantules et favorisant le ruissellement de l'eau.

2.5.3.4 Couvert végétal et résidus de culutre

L'érosion hydrique cause généralement peu de perte de sol sous couverture forestière ou herbacée naturelle, même pour des pentes à forte inclinaison (TABLEAU 9). Les prairies permanentes et les champs conservant leurs résidus de culture à la surface du sol offrent également une bonne protection. Le matériel végétal, en absorbant une partie importante de l'énergie de la pluie, protège le sol de l'impact des gouttes d'eau, augmente l'infiltration, retarde le ruissellement et le mouvement des particules de sol. La protection varie avec la densité du couvert végétal et le type de pratiques culturales.

TABLEAU 9 -- **Pertes de sol annuelles moyennes à Saint-Coeur-de-Marie, Cap-aux-Corbeaux et Lennoxville pour différentes cultures**

Traitement	Terre érodée (kg/ha)
1- Loam Taillon, Saint-Coeur-de-Marie sur pente 18% (6 ans)	
Prairie permanente	3
Foin (perpendiculairement à la pente)	11
Foin (sens de la pente)	9
Céréales (perpendiculairement à la pente)	150
Céréales (sens de la pente)	500
Sol nu	34 000
2- Loam sablo-graveleux Charlevoix, Cap-aux-Corbeaux sur pente 15% (10 ans)	
Prairie	60
Foin	560
Céréales	3 800
Pomme de terre (perpendiculairement à la pente)	3 300
Pomme de terre (sens de la pente)	6 000
Sol nu	28 100
3- Loam argileux Coaticook, Lennoxville sur pente 10% (4 ans)	
Prairie permanente	190
Maïs sur chaume (culture minimale, sens de la pente)	1 000
Maïs fourrager en continu (sens de la pente)	12 700
Sol nu	31 100

Source: Mehuys (1981)

2.5.4 Effets de l'érosion hydrique

L'effet principal de l'érosion hydrique est l'enlèvement des particules de sol à texture fine et de la matière organique dans la partie la plus fertile du profil rendant le sol moins apte à la production agricole. Étant donné que les 15 premiers centimètres d'un hectare de sol minéral pèsent environ 2 000 tonnes, on peut évaluer à 64 ans le temps nécessaire pour faire disparaître complètement la couche arable si la perte annuelle de terre en sol nu est de 31 000 kilogrammes/hectare telle que mesurée à Lennoxville (TABLEAU 8) (Pesant et al., 1980).

En réduisant l'épaisseur de la couche arable, l'érosion diminue la capacité de rétention capillaire du sol et entraîne également une partie des substances nutritives. Le coût de remplacement de ces substances par les engrais chimiques serait de 15 à 30 $/hectare selon l'Institut agricole du Canada.

L'érosion hydrique a également un impact négatif sur le milieu aquatique en y laissant des matières solides, des éléments nutritifs et des pesticides. Les matières solides, en créant une turbidité élevée, réduisent la pénétration de la lumière dans le milieu. Le taux de sédimentation accru dans les cours d'eau rehausse les fonds et en modifie la texture et la composition chimique.

L'entraînement des matières nutritives vers les milieux aquatiques accélère l'eutrophisation et contribue à la perte de qualité des eaux. Quant aux pesticides, ils créent un risque de contamination des cours d'eau et de l'eau potable (Bernard, 1984).

2.6 Érosion éolienne

L'érosion éolienne constitue un des modes de dégradation des sols contribuant à la perte de productivité des terres. Pour le Québec, cette forme d'érosion est un problème de moindre importance que l'érosion hydrique.

La sévérité de l'érosion par le vent dépend des conditions d'équilibre entre le climat, le sol et la végétation. Lorsque la végétation recouvre le sol, il y a peu d'érosion éolienne. Quand l'homme modifie cet équilibre soit par des cultures intensives ou par la surpaissance, il en résulte un déséquilibre d'autant plus grand que le sol est léger et facile à pulvériser, dépourvu de cohésion et formé de sable ou d'agrégats fins.

L'érosion éolienne se manifeste principalement dans les régions exposées à la sécheresse, à une faible pluviosité, à des températures élevées et soumises à une forte évaporation causée par des vents forts et fréquents.

2.6.1 Facteurs influençant la résistance des sols à l'érosion éolienne

Les causes de l'érosion éolienne se classent en deux groupes (Chepil et Woodruff, 1963). Le premier comprend les facteurs qui dépendent du niveau d'énergie interne du sol soit, la stabilité de la structure, le contenu en eau et en matière organique. Le second groupe comprend les facteurs qui dépendent de l'environnement, soit la vitesse du vent, le couvert végétal, les résidus de récoltes, la rugosité de la surface et la longueur des champs.

2.6.1.1 Stabilité de la structure

La résistance d'un sol minéral à l'érosion éolienne dépend du diamètre des particules et des agrégats. Une proportion de plus de 50% d'agrégats de diamètre supérieur à 0,84 millimètre dans un sol indique une bonne résistance à l'érosion comparativement aux sols plus sensibles qui contiennent surtout des agrégats de 0,05 à 0,5 millimètre de diamètre (Chepil et Woodruff, 1963). Ainsi, les pratiques culturales qui tendent à briser les agrégats ou à en diminuer leur stabilité, rendent les sols plus sensibles à l'action des vents.

Les sols organiques en culture sont très affectés par l'érosion éolienne à cause de la légèreté des particules et de l'instabilité de la structure. Le seul agent retenant ces particules entre elles est l'eau. Lorsque la surface du sol se dessèche, aucun agent liant ne les retient et

le moindre vent entraîne les particules en suspension dans l'air. Des risques majeurs d'érosion surviennent principalement en début d'été alors que la végétation démarre et que le sol s'est ressuyé, et après la récolte.

2.6.1.2 Contenu en eau du sol

Lorsque le sol est humide, un film d'eau à la surface des particules agit comme agent de cohésion interparticulaire. Cette force de cohésion varie directement avec le contenu en humidité du sol et est souvent associée à la vitesse du vent. Le vent a peu d'emprise sur les sols minéraux dont le contenu en eau se situe au dessus du point de flétrissement (Chepil et Woodruff, 1963). Les sols sableux contenant peu de matière organique et qui retiennent peu d'eau sont les premiers à se dessécher et à être emportés par le vent. Les sols plus argileux sont moins sensibles même s'ils sont constitués de particules fines, parce qu'ils se dessèchent moins rapidement. Pour les sols organiques, un contenu en eau inférieur à 44% accroît la sensibilité à l'érosion éolienne (Wojahn, 1960).

2.6.1.3 Contenu en matière organique des sols minéraux

Un contenu élevé en matière organique favorise la granulation des particules de sol en agrégats vulnérables à l'érosion. Cependant, l'incorporation de matière organique facilement décomposable stabilise la structure du sol et augmente la quantité d'agrégats stables à l'eau. Ainsi, le rôle de l'humus sur la productivité du sol dépasse largement ses inconvénients (Chepil et Woodruff, 1963).

2.6.1.4 Vitesse du vent

L'érosion éolienne se produit lorsque le vent détache et entraîne des particules de sol qui, en rebondissant à la surface du sol, en délogent d'autres et initient un mouvement de saltation. Le glissement ou roulage des particules plus grosses (de 0,5 à 1,0 millimètre de diamètre) à la surface du sol constitue le mouvement de reptation qui brise les agrégats et libère en suspension dans l'air de fines poussières de moins de 0,1 millimètre. Finalement, la concentration de ces mouvements sur une certaine distance provoque l'avalanche (Woodruff et al., 1977).

La sensibilité d'un sol à l'érosion éolienne augmente donc avec la vitesse du vent. Ainsi un vent de 50 kilomètres à l'hectare a une force érosive trois fois supérieure à celle d'un vent de 30 kilomètres à l'hectare (Woodruff et al. 1977). Sur sol minéral, une vitesse de 29 kilomètres à l'hectare peut être considérée comme critique (Lumkes et Velde, 1974). Dans le cas des sols organiques, l'érosion éolienne peut commencer avec des vents aussi faibles que 10 à 15 kilomètres à l'hectare (Kuntze, 1976).

2.6.1.5 Couvert végétal

Les plantes ou résidus de cultures constituent une protection efficace contre l'action du vent. Non seulement, ils réduisent sa vitesse en surface, mais ils absorbent également une grande partie de sa force érosive. Le couvert végétal offre l'avantage de retenir les particules en mouvement et de s'opposer à l'effet d'avalanche (Woodruff et al., 1977).

2.6.1.6 Rugosité de la surface

Les surfaces lisses sont plus sensibles à l'érosion éolienne que les surfaces rugueuses car elles sont moins efficaces pour diminuer la vitesse du vent près de la surface du sol. Les billons et dépressions formés par les machines aratoires ne sont vraiment efficaces que s'ils sont constitués surtout d'agrégats de dimensions suffisantes pour résister à l'érosion. Dans ce cas, ils agissent comme amortisseurs et déflecteurs du vent et comme capteurs des particules abrasives en saltation. La hauteur de ces buttes devrait varier entre 5 et 13 centimètres pour ne pas créer trop de turbulence (Woodruff et al., 1977).

2.6.1.7 Longueur des champs

La distance laissée au vent pour amorçer la saltation et démarrer l'érosion est liée directement aux dimensions des champs et à la direction du vent (Woodruff et al., 1977). Ainsi, sur de grandes superficies, le vent exerce une plus grande emprise sur le sol.

2.6.2 Dommages occasionnés par l'érosion éolienne

2.6.2.1 Dommages à la végétation

Beaucoup de pertes surviennent au printemps lorsque les jeunes plantules sont encore fragiles et peu développées. Les plantations de tabac sont parfois détruites sous l'action abrasive des sables poussés par le vent. Dans certains cas, la densité des peuplements se trouve fortement réduite ce qui entraîne ultérieurement une baisse de rendement et de qualité. La fermeture des stomates découlant d'un taux de transpiration élevé, résulte en une réduction de la photosynthèse (Sturrock, 1975). Les particules de sol, en se collant sur les parois des parties aériennes, provoquent l'asphyxie des plantes (Morgan, 1974). Il arrive aussi que le sol soit emporté au point de dénuder les racines des plantules ou les graines non germées.

2.6.2.2 Dispersion des éléments fins du sol

La dispersion des éléments fins du sol (limon, argile et matière organique) provoque un changement dans la composition texturale. Il en résulte un sol contenant une forte proportion d'éléments grossiers dont la capacité de rétention pour les éléments nutritifs est faible (Lyles, 1977). Les pesticides fixés au sol sont également dispersés avec les poussières érodées.

2.6.2.3 Vent comme moyen de transport

Tout en provoquant l'engorgement et le remplissage des fossés, routes, canaux et puits, le vent peut transporter des graines de mauvaises herbes, des insectes et des maladies parasitaires sur de grandes distances

(Woodruff et al., 1977). L'herbe, les arbres, les buissons et les haies sont étouffés ou ensevelis sous d'épaisses couches de particules érodées.

2.6.3.4 Destruction des sols organiques

La pulvérisation des sols organiques par le vent demeure une des causes dominantes de leur dégradation. Ceci s'explique par la légèreté des particules et l'absence de cohésion entre elles. Ainsi, le vent peut emporter annuellement jusqu'à 22 tonnes/hectare de sol organique (Parent, 1982).

2.7 **Acidification des sols**

L'acidification des sols est un processus par lequel les éléments solubles tels le calcium et le magnésium sont lessivés par les précipitations et remplacés par l'hydrogène et l'aluminium sur les sites d'échange du sol. D'autres sources d'acidification telles la respiration des organismes vivants du sol, l'absorption des cations basiques par les racines et la décomposition de la matière organique contribuent à l'acidification naturelle des sols. Cependant, cette section traite plus particulièrement de l'acidification accélérée des sols par les engrais chimiques (azote et soufre) et les précipitations acides.

2.7.1 Influence de la roche-mère sur l'acidité des sols

La roche-mère servant à la formation de la couche arable influence l'acidité du sol en place. Ainsi, les sols issus d'une roche calcaire contiennent plus de produits basiques; ils sont moins acides même dans les horizons supérieurs que les sols provenant de roches granitiques, gréseuses ou schisteuses. Ceci explique pourquoi les sols de certaines régions du Québec sont plus acides que d'autres.

Dans la région du plateau laurentidien s'étendant au nord du fleuve Saint-Laurent, on retrouve généralement des roches-mères granitiques qui contiennent peu de cations. Leurs dégradation et altération amènent un sol désaturé et donnent naissance à des sols acides. Il en est de même dans la région des Appalaches sur les grès, les schistes et les quartzites et aussi dans les plaines sablonneuses de la vallée du Saint-Laurent.

A l'inverse, on retrouve au Québec des sols issus de dépôts morainiques et fluvio-glaciaires provenant de formation calcaire. On les retrouve dans la région des Appalaches et dans la vallée du Saint-Laurent. Dans cette dernière, il y a également des sols formés sur roche-mère argileuse issus de dépôts marins riches en bases, donc moins acides.

L'acidité naturelle des sols est donc fonction de la roche-mère. Cependant des facteurs extérieurs tels les engrais et les dépôts acides modifient le pH des sols.

2.7.2 Symptômes de l'acidification des sols

La décomposition de la matière organique en sol acide s'effectue lentement en raison d'une faible activité biologique. On retrouve d'un labour à l'autre, des résidus organiques à peine décomposés. Les rendements diminuent malgré l'apport d'une fertilisation appropriée. La fixation de l'azote par les légumineuses diminue à cause du nombre limité de nodules sur les racines. La structure du sol peut devenir plus compacte en raison de l'instabilité du complexe argilo-humique. Des signes de carence en calcium, phosphore ou autres éléments peuvent se manifester ainsi que des toxicités en Al, Fe, Mn et Zn. Des films d'hydroxyde ferrique recouvrent les flaques et les ruisseaux provenants des sols acides. Une végétation acidophile re-

groupant des plantes comme les fougères, la petite oseille et la digitale s'installe lentement.

2.7.3 Effets de l'acidification des sols

Un des premiers effets de l'acidification des sols est sans contredit la baisse des rendements et la variation de la composition chimique des plantes associées aux changements de concentrations et des rapports des éléments nutritifs entre eux dans la solution du sol (Dionne, 1979). Cette variation du pH peut entraîner une perte et une diminution de la disponibilité des éléments nutritifs, une augmentation de l'aluminium et du manganèse ainsi que d'autres éléments en solution qui peuvent être toxiques (Dionne, 1979).

De plus, l'acidité des sols réduit l'activité enzymatique et biologique des micro-organismes nécessaires à la croissance et au développement des végétaux. Ainsi, la transformation de certains engrais azotés sous forme disponible aux plantes ne peut s'effectuer adéquatement. C'est le cas de l'urée, l'engrais azoté le moins coûteux et le plus utilisé qui doit être transformé en nitrate avant d'être absorbé par les plantes.

L'acidification des sols réduit l'efficacité de plusieurs herbicides, accroît la sensibilité des plantes aux maladies cryptogamiques et rend difficile l'implantation de certaines cultures (luzerne, par exemple).

2.7.4 Facteurs contribuant à l'acidification des sols

2.7.4.1 Engrais chimiques

L'azote et le soufre sont les principaux éléments acidifiants attribués aux engrais chimiques. Selon Coote et al. (1982), l'effet de la fumure azotée, principalement de l'ammoniaque, sur le pH du sol, serait de 2 à 10 fois supérieur à l'acidité occasionnée par les dépôts acides. L'acidification résultant de l'utilisation des fertilisants azotés dépend également de la quantité d'engrais utilisée et de la formulation chimique de ces engrais. Coote et al. (1984) estiment à 35 kilogrammes/hectares/an les besoins en $CaCO_3$ pour neutraliser l'acidité des précipitations acides comparativement à 51 kilogrammes de $CaCO_3$ par hectare de terres améliorées par les engrais chimiques. Pour ces derniers, les quantités nécessaires peuvent dépasser 500 kilogrammes/hectares/an de $CaCO_3$ pour des parcelles recevant de fortes doses d'engrais azotés. L'acidification artificielle des sols est donc minime si l'on se base uniquement sur la quantité de chaux agricole requise pour neutraliser l'acidité imputable à ces formes acidifiantes comparativement aux doses massives que les producteurs utilisent tous les 3 ou 5 ans.

L'acidification par les engrais azotés se produit lors du processus de nitrification qui transforme chaque molécule d'ammoniaque en un ion hy-

drogène et un ion nitrate. Dans le cas du phosphate d'ammonium, quatre ions hydrogène sont produits par molécule. De plus, le lessivage du nitrate à travers le sol entraîne le calcium pour maintenir une charge électrique neutre dans la solution du sol. Le tableau 10 démontre l'effet acidifiant de certains engrais.

Pour sa part, l'addition de soufre au sol sous forme élémentaire, de sulfure ou d'anhydride sulfureux, entraîne diverses réactions chimiques dans le sol conduisant à la production d'acide sulfurique, acidifiant ainsi le sol.

Par contre l'acidification devient plus importante si l'on considère l'effet de l'azote sur les cultures exigeantes comme le maïs ou les prairies (TABLEAU 11). La nitrification produira assez d'acidité pour requérir une dose de chaux de 600 kilogrammes/hectare et si 50% de l'azote n'est pas absorbé par les plantes, le potentiel d'acidification s'élève à 900 kilogrammes de $CaCO_3$ par hectare dans le cas du maïs. Ainsi, plus la plante absorbe d'azote, moins il y a de lessivage des nitrates à travers le sol d'où une acidification réduite. La fertilisation des prairies aura un effet moins acidifiant sur le sol que la fertilisation du maïs mais plus marqué que celle des céréales.

Les risques d'acidification demeurent les plus grands dans l'Est du Canada, car les sols contiennent moins d'ions calcium et magnésium pouvant neutraliser les acides. Toutefois, l'effet acidifiant des engrais se corrige facilement par l'emploi de chaux agricole mais celà représente un coût additionnel pour le producteur agricole.

TABLEAU 10 -- **Quantités de $CaCO_3$ exigées pour neutraliser l'azote de quelques engrais chimiques**

Engrais	Nitrification de l'ammonium (kg $CaCO_3$/kg N)	Lessivage du nitrate	Total
Sulfate d'aluminium	7,1	3,6	10,7
Phosphate d'ammonium	6,8	3,6	10,4
Ammoniaque anhydre	3,6	3,6	7,2
Urée	3,6	3,6	7,2
Nitrate d'ammonium	1,8	3,6	5,4

Source: Andrews (1954)

2.7.4.2 Précipitions acides

Les précipitations acides se manifestent principalement dans les régions fortement industrialisées de l'Amérique du Nord, incluant le Québec, de même que dans les régions situées dans l'axe principal des vents dominants. Au Québec, l'acidification est la plus marquée dans l'Outaouais et dans la région du Lac Saint-Jean.

Les précipitations sont naturellement acides. Elles ont un pH d'environ 5,6 à cause du CO_2 de l'atmosphère qui réagit avec l'eau et forme de l'acide carbonique, un acide faible qui augmente légèrement l'acidité des précipitations. Cependant, les pluies acides se caractérisent par un pH beaucoup plus bas. Ainsi, les précipitations du Nord-Est du continent en 1980 avaient un pH variant de 4,2 à 4,5 (FIGURE 6).

Les produits responsables de cette acidité sont le bioxyde de soufre (SO_2) et les oxydes d'azote (NO_x). Ces produits se transforment en acide sulfurique (H_2SO_4) et en acide nitrique (HNO_3). Ils sont véhiculés en partie par les précipitations, ce qui en explique leur acidité (dépôt humide). Ces deux polluants (SO_2 et NO_x) peuvent également être éliminés sous forme de dépôt sec en l'absence de précipitation. Le SO_2 peut être absorbé par la végétation et le sol ou se dissoudre dans les cours d'eau. Le terme "dépôts acides" s'utilise fréquemment puisqu'il désigne les deux formes de déposition des polluants atmosphériques transportés sur de longues distances.

TABLEAU 11 -- **Augmentation de l'acidité des sols occasionnée par l'utilisation des engrais chimiques azotés**

Culture	Engrais utilisé (kg N/ha)	Nitrification de 50% de l'ammonium	Lessivage de nitrate	Total
	Urée ou NH_3	(kg $CaCO_3$/ha)		
Maïs	170	600	300	900
Céréales	60	210	100	310
Prairie	110	390	200	590
	Phosphate d'ammonium			
Maïs	170	1150	600	1750
Céréales	60	400	210	610
Pâturage	110	740	390	1130

Source: Côté et MacKenzie (1980).

FIGURE 6 **Carte d'isocourbes de pH moyens annuels en Amérique du Nord pour l'année 1980**

Données en provenance des réseaux canadiens et américains de collecte de précipitations.

Source:Moi (1982).

Le SO_2 est le principal agent responsable de l'acidification des pluies et de l'atmosphère. Aux États-Unis, il provient principalement de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. Au Canada, les émissions de SO_2 émanent pour 40% d'usines d'extraction des minéraux. Au Québec, plus de 50% viennent des usines de Rouyn-Noranda (MOI, 1982b).

Les oxydes d'azote (NO_x) proviennent principalement du secteur des transports et aussi des centrales thermiques et des sources de combustion à haute température. Le tableau 12 indique les quantités totales de SO_2 et NO_x émises aux États-Unis, au Canada et au Québec en 1980.

Pour l'année 1982, les précipitations acides ont apporté entre 7 et 14 kilogrammes/hectare de soufre et entre 6 et 10 kilogrammes/hectare d'azote dans les régions agricoles du Québec (Bélanger, 1984).

TABLEAU 12 -- **Quantités de SO_2 et de NO_x dans l'atmosphère en 198 aux États-Unis, au Canada et au Québec**

RÉGION	SO_2 (t. 10^6)	NO_x (t. 10^6)
États-Unis	24,1	19,3
Canada	4,8	1,8
Québec	1,0	0,3

Source: MOI (1982b).

2.7.4.2.1 Impacts des dépôts acides sur les cultures

L'effet des précipitations acides sur les cultures en plein champ n'est que peu connu. A ce jour, les expériences consistaient à asperger les cultures avec des solutions acidifiées simulant l'acidité des précipitations et à noter les effets provoqués par ces arrosages. Plusieurs auteurs dont Jacobson (1980) et Evans (1982) ont signalé les différents effets que les solutions acides peuvent avoir sur les cultures dont:

- Créer des lésions sur les feuilles et les chloroplastes
- Affecter le rendement
- Affecter les processus de croissance, le métabolisme et les organes reproducteurs des plantes
- Interférer avec le fonctionnement normal des cellules de garde et endommager la cuticule
- Accélérer le lessivage de certaines substances des organes foliaires
- Interférer au niveau des relations entre la plante et leurs parasites et au niveau des nodules de légumineuses

Les expériences avec les solutions acides ont permis de déceler les principaux effets potentiels des précipitations acides, mais elles ne permettent pas de conclure que les mêmes effets se produisent sur le terrain.

2.7.4.2.2 Effet fertilisant de l'azote et du soufre contenus dans les précipitations acides

L'azote et le soufre sont des éléments importants de fertilisation pour la croissance des cultures. Les précipitations acides contiennent une certaine quantité de ces produits sous forme d'ions assimilables par les plantes. On les retrouve également dans l'atmosphère sous forme de gaz pouvant être assimilés par le feuillage.

L'apport d'azote en provenance des précipitations et de l'atmosphère est négligeable par rapport aux besoins des cultures (Olson, 1982). Cependant, il en va tout autrement pour le soufre. La quantité de soufre apportée par les précipitations correspond approximativement aux prélèvements des cultures. Une étude dans trois régions agricoles du Québec a permis de constater que l'apport de soufre par les précipitations correspondait environ au prélèvement des cultures d'orge (Mnkeni et MacKenzie, 1981).

Plusieurs études américaines tendent à démontrer que le soufre atmosphérique comble une partie importante des besoins des cultures. Olson (1982) signale que la plupart des carences en soufre se manifestent dans les régions ne recevant pas de précipitations acides.

Selon Coote (1983), la valeur fertilisante des dépôts acides dans l'est du Canada serait de plus de 10 fois supérieure à la valeur de la chaux requise pour les neutraliser. Cette estimation ne tient pas compte des pertes potentielles que les cultures peuvent subir sous forme de rendement et de qualité de produit.

2.8 Contrôle de l'eau du sol

Le sol constitue l'infrastructure de la production agricole. S'il est mal drainé, il ne peut assurer aux plantes les conditions optimales pour en tirer le plein potentiel de production. Les travaux d'assainissement demeurent les premiers pas à effectuer dans la gestion de la ressource pédologique en vue d'une optimisation de la production agricole.

Un peut considérer de façon générale que les travaux de drainage vont permettre de travailler les sols dans les conditions optimales d'humidité, réduisant ainsi les risques de détérioration de leurs propriétés physiques et hydrodynamiques. Toutefois, des travaux ne convenant pas à certains types de sols soit à cause de leur nature ou de leur topographie ou réalisés durant des conditions d'humidité adverses, pourront entraîner parfois une dégradation des sols.

L'utilisation des connaissances acquises à ce jour dans le domaine de l'hydraulique agricole, la réalisation d'études de sol complètes préalablement à tout projet de drainage et l'obligation de se conformer à des normes minimales lors de l'exécution de travaux sont les moyens qui permettront d'éviter que la dégradation des sols ne devienne une conséquence de la réalisation de travaux de drainage.

2.8.1 Effets de l'excès d'humidité des sols

Les excès d'eau ont des effets négatifs sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. L'eau en excès favorise la dégradation de la structure en la rendant moins stable. De plus, le travail du sol en période humide contribue à la destruction des agrégats.

L'excès d'eau dégrade aussi les propriétés chimiques en accélérant la décalcification et l'acidification des sols. Dans les sols détrempés, les ions Ca^{++} s'éloignent du complexe argilo-humique, lesquels sont lessivés et remplacés par des ions H^{+} et Al+3 rendant acides les sols trop humides. Les sols dont la saturation se prolonge subissent la réduction des oxydes ferriques en oxydes ferreux et présentent des taches de gley.

L'excès d'eau affecte également les propriétés biologiques du sol, en créant des conditions anaérobies ce qui ralentit la décomposition et l'humification des matières organiques et en freine leur minéralisation. Il limite également le développement et la nutrition des racines, et peut provoquer leur asphyxie. L'excès d'eau favorise la prolifération d'une flore et d'une faune peu favorables aux cultures.

2.8.2 Conséquences de l'excès d'humidité des sols

Un sol mal drainé ou souffrant d'un excès d'humidité se traduit par un faible rendement des cultures pratiquées. Sous nos conditions un excès

l'humidité au printemps retardera les semis réduisant ainsi la période de végétation utile.

De plus, les opérations culturales requises tels que le binage, les traitements antiparasitaires et les apports d'engrais ne peuvent être faits en temps sans risquer de tasser le sol. En outre, le coût des opérations culturales est généralement plus élevé.

2.8.3 Problèmes associés au drainage superficiel

Le drainage de surface et l'aménagement du sol en vue d'éliminer les eaux de ruissellement sont pratiqués depuis longtemps sous la forme de planches arrondies, de fossés et de rigoles.

Le drainage de surface est surtout nécessaire lorsque l'infiltration et la perméabilité sont faibles ou quand une couche indurée restreint l'écoulement en profondeur rendant le drainage souterrain impossible.

Toutefois les travaux d'arrondissement entraînent de forts déplacements de sol arable vers le milieu des planches. Des observations sur quelques fermes ont montré une épaisseur de sol arable atteignant parfois les 50 centimètres au centre alors que les bords des raies de curage étaient décapées sur des distances de 5 à 6 mètres (DeKimpe et al., 1981; Asselin, 1980).

Parallèlement, le décapage des bords de planches favorise l'érosion notamment dans les sols légers où des cultures annuelles sont pratiquées. Le fermier se voit alors dans l'obligation de faire des travaux d'entretien régulièrement. Le décapage du sol a pour effet de réduire considérablement le rendement de la culture dans cette portion de la planche.

Ces formes bombées ont aussi le désavantage de contribuer à une mauvaise répartition de la pluie en période sèche. En effet, lors des orages d'été, une grande partie de la précipitation peut ruisseller alors que le sol est en déficit hydrique. De plus, ce modelage crée des pentes artificielles qui dépassent les limites permises pour certains types de sols. En conséquence, le ruissellement génère de l'érosion.

2.8.4 Problèmes associés au drainage souterrain

Contrairement au drainage de surface, le drainage souterrain permet de rabattre la nappe d'eau, créant ainsi de meilleures conditions pour la croissance des plantes. Le fait de rabattre et de contrôler la nappe d'eau facilite l'entrée et la circulation de la machine agricole aux champs et rend le travail plus efficace.

Plusieurs autres avantages découlent du drainage souterrain: 1) réchauffement plus rapide du sol, 2) meilleure aération, 3) plus grande utilisation des engrais par les plantes, 4) augmentation des rendements, 5) sol bien conditionné, 6) et meilleur choix de cultures. Le drainage permet de cultiver une plus grande superficie en éliminant les fossés profonds.

Certains sols présentent des difficultés particulières lors de la conception et de l'installation des réseaux. Assez souvent, des installations faites en absence d'études de sol se révèlent complètement inefficaces après quelques années sinon immédiatement.

Un type de problème est le drainage excessif des sols de texture sablonneuse. En effet, le rabattement de la nappe d'eau au niveau des drains tôt au printemps aggravera, pour les sols à faible capacité de rétention, le déficit hydrique que l'on connaît généralement en été.

Également dans les sols sableux, les systèmes de drainage sont sujets à deux types de colmatage qui peuvent les rendre complètement inefficaces après quelques années. Ce sont le colmatage minéral et le colmatage par hydroxyde de fer.

Le colmatage minéral se produit surtout dans les sables et il consiste à l'entrée de sol à l'intérieur de la conduite qui finit par l'obstruer. Il peut également se produire dans des sols composés en grande partie de limons fins, qui sont des particules sans cohésion dont les dimensions se situent entre 0,002 et 0,05 millimètre. De nombreux cas d'ensablement ont été observés dans des systèmes dont les matériaux de drainage utilisés ne répondaient pas aux caractéristiques de la granulométrie du sol.

Le colmatage par hydroxyde de fer est dû à un processus chimique et biologique. En effet, le fer libre en solution dans l'eau est transformé par des bactéries ferrigineuses. Ces bactéries produisent des dépôts de matière gélatineuse qui obstruent les ouvertures du drain et parfois complètement la section du tuyau. Ce type de colmatage se produit dans les terres sableuses. Une étude faite dans la région de Nicolet sur 14 fermes a montré un colmatage avancé après 6 ans pour la majorité des systèmes de drainage observés (Asselin, 1985b).

Les argiles, à cause de la cohésion des particules, forment des sols dont la structure est stable. Pour cette raison, les risques de colmatage par l'entrée de sol dans les conduites sont généralement inexistants et nous n'avons pas besoin de matériau filtrant autour du drain. Pour ces raisons, on a toujours pensé et on pense encore aujourd'hui, que les argiles sont plus faciles à drainer que les sables.

Pourtant, même si le risque de colmatage n'existe pas comme dans les sables, d'autres problèmes se présentent et s'ils ne sont pas identifiés par le concepteur du projet, l'agriculteur se paiera un système de drainage dont l'efficacité peut être fortement compromise.

L'un de ces problèmes est le lissage de l'argile par l'outil de pose lors de l'installation. Il a été observé que dans les argiles à forte teneur en eau, la charrue-taupe détruisait la structure du sol autour du drain diminuant ainsi de façon radicale l'entrée de l'eau dans le drain et par conséquent, le taux de drainage (Asselin, 1985c). Bien que ces problèmes aient été étudiés sur quelques fermes de la région de Nicolet (04), des discussions avec des entrepreneurs nous permettent de soupçonner qu'ils existent dans d'autres régions.

Soulignons qu'au Québec, la presque totalité des installations est faite par la charrue-taupe. En plus, ce qui n'aide pas, la majorité des installations sont faites durant les périodes du début de mai et fin octobre alors que la nappe d'eau est près de la surface et que le sol est humide.

2.8.5 Problèmes associés au creusage des fossés et cours d'eau

Le creusage de cours d'eau pour l'élimination des eaux de surface est la première étape dans la mise en valeur des terres pour l'agriculture.

Les travaux de creusage de cours d'eau par les services du ministère de l'Agriculture du Québec remontent au début des années 1940. Ces travaux visaient notamment à donner aux cours d'eau les capacités suffisantes pour assainir plus efficacement les terres et les rendre propices à l'exploitation agricole. Depuis 1955, le creusage de cours d'eau totalise environ 1 200 kilomètres par année permettant d'améliorer une superficie approximative de 40 000 hectares.

Cependant, le creusage et le nettoyage des cours d'eau dans certains sols peuvent entraîner des problèmes d'érosion à cause de l'augmentation de la vitesse d'écoulement et de l'instabilité du sol lui-même. Ce creusage risque également de réactiver un processus d'érosion régressive à l'échelle du bassin versant (les tributaires de ce cours d'eau tendent à retrouver un nouveau profil d'équilibre dû à l'abaissement du niveau de base). On trouve de nombreux phénomènes d'érosion régressive d'origine anthropique dans la plaine du Saint-Laurent notamment au niveau de la deuxième terrasse (Lancery, 1984).

L'instabilité des talus est un facteur qui contribue fortement au processus d'érosion et de sédimentation des cours d'eau. Elle peut être causée par des éléments naturels tels que: la résistance mécanique du sol, la résistance aux forces d'arrachement de l'écoulement, le suintement des parois et les glaces.

En général, les causes naturelles reliées aux sols et à la topographie peuvent être contrôlées par une bonne conception de projet qui prévoit des mesures de protection comme l'enrochement, la construction de seuils et l'engazonnement des talus.

Par contre, dans beaucoup de cas, l'utilisation et la gestion des cours d'eau par les riverains contribuent grandement à la détérioration de ces derniers. A titre d'exemple, on peut signaler que la mise en culture des sols sur les bords des cours d'eau, la construction de fossés et de rigoles débouchant dans les talus, les sorties de drainage non protégées, la construction de ponceaux de diamètre insuffisant pour la capacité du cours d'eau, l'abreuvement des animaux dans les cours d'eau sont des facteurs qui contribuent fortement à la dégradation des cours d'eau après leur aménagement.

2.9 Affaissement des sols organiques

Par définition, un sol organique contient plus de 30% de matière organique sur une épaisseur d'au moins 40 à 60 centimètres, selon que le matériel est plus ou moins décomposé. Le sol organique provient de la décomposition de matériel végétal comme les roseaux, joncs, carex, mousses et arbres. Les tourbières se forment lorsque le taux d'accumulation des végétaux excède le taux de décomposition. Ce phénomène est généralement associé aux terres humides en dépression comme les étangs ou les lacs de tourbières.

Au Québec, il y a environ 4 000 000 hectares de sols organiques mais la majorité de ceux-ci sont situés en territoire nordique. Seulement 2%, soit 80 000 hectares de cette superficie, peuvent être exploitées pour la tourbe ou la production maraîchère. La production maraîchère se concentre au sud-est de Montréal, dans les comtés de Châteauguay, Napierville, Iberville et Missisquoi dans des dépôts organiques totalisant 20 000 hectares. A l'heure actuelle, 10 000 hectares de cette superficie sont consacrées à la production maraîchère.

Étant donné la faible superficie disponible en sol organique et le processus continuel de dégradation de ces sols après leur mise en culture, la conservation des sols organiques pour la production maraîchère demeure prioritaire. La connaissance du processus de dégradation des sols organiques est donc essentielle à l'établissement d'une régie rationnelle de ces sols.

2.9.1 Processus de l'affaissement des sols organiques

L'affaissement des sols organiques après drainage et mise en culture est un processus irréversible, lent et permanent. Les causes principales de l'affaissement sont le tassement du sol, les pertes de matières solides par oxydation et lessivage, et finalement, la compression du sol. L'oxydation et le tassement du sol se produisent au-dessus de la nappe phréatique, tandis que la compression a lieu principalement sous la nappe.

Le tassement du sol résulte du rétrécissement des fibres par séchage et de la perte de flottaison du sol à la suite du drainage. Le fractionnement des fibres par le travail du sol et l'action des organismes telluriques accélèrent également le tassement du sol. Le fractionnement est un processus irréversible tandis que le rétrécissement est partiellement réversible. Dans les deux cas, la densité du sol augmente.

L'oxydation est un processus irréversible de perte de matière organique sous forme de CO_2, de H_2O et de composés solubles. L'aération du sol après le drainage augmente l'activité des micro-organismes hétérotrophes. L'activité des micro-organismes a pour conséquence la production d'enzymes qui catalysent l'oxydation des matières organiques. L'activité microbienne stimulée par le chaulage des sols organiques acides, est d'autant plus forte que le sol est riche en matière organique. En effet, les matières minérales diminueraient le taux d'oxydation des matières organiques en se combinant avec elles sous forme de complexes argilo-humiques. De

plus, la vitesse des réactions biologiques double pour chaque augmentation de 10°C entre 5 et 35°C, où elle atteint son maximum (Jasmin et al., 1977). Enfin, l'activité microbienne est grande lorsque le sol contient 40% d'humidité en volume.

La compression est un processus réversible causé par la perte de flottaison des couches supérieures de sol. L'augmentation de la pression sur les couches se trouvant sous la nappe d'eau cause un accroissement de la densité du sol.

Le taux maximal d'affaissement se manifeste au cours des premières années (de 2 à 5 ans) suivant le drainage. Il est dû principalement à la compression et au tassement du sol. Une étude menée en Hollande a démontré que 44% de l'affaissement observé sur une période de 20 ans, s'est produit durant les deux premières années après le drainage. Une autre étude a démontré que, sous prairie, 85% de l'affaissement était dû à l'oxydation et 15% au tassement sur une période de 1 000 ans. Par conséquent, l'affaissement initial est dû principalement à des processus physiques, alors que l'affaissement subséquent est lié surtout à l'oxydation des matières organiques. Toutefois, cette conclusion se limite aux sols organiques sous prairie, puisque les sols organiques en production maraîchère peuvent subir un affaissement accéléré dû à l'érosion de ces sols par l'eau et le vent. De plus, le processus d'oxydation est plus rapide sous culture intensive que sous culture extensive.

2.10 **Contamination des sols**

2.10.1 Boues résiduaires

L'application de boues résiduaires sur les sols agricoles du Québec n'a suscité que peu d'intérêt jusqu'à maintenant étant donné les faibles quantités de boues récupérées. De plus, lorsque l'on procédait à leur récupération, la pratique la plus courante consistait à les enfouir dans les dépotoirs et parfois même à les incinérer suite aux traitements physico- chimiques. La Communauté urbaine de Montréal utilisera ce dernier procédé lorsque son usine de traitement des eaux usées sera en pleine activité.

Pour des raisons environnementales et énergétiques, l'application au champ d'un tel produit bien que faible en matière organique mais contenant des teneurs intéressantes en azote et en phosphore semble être une heureuse alternative. Cette valeur fertilisante indéniable est sous-estimée au Québec. En Ontario, où des quantités beaucoup plus importantes de boues sont recueillies, 32% de toute la quantité de boues produites est épandue sur des sols utilisés en bonne partie à des fins agricoles. Cette utilisation permet de recycler (de la valeur précédente) 97% de toutes les boues récupérées et de les utiliser pour la production de récoltes. Le tableau 13 (Webber 1984b) montre la composition des boues de quelques villes ontariennes alors que le tableau 14 (Saint-Yves, 1985) présente les valeurs moyennes obtenues pour certaines boues provenant du Québec comparativement à celles de villes américaines (Environnemental Protection Agency, 1983).

2.10.1.1 Boues et risques de contamination de l'eau et des sols

Les boues sont généralement ajoutées au sol en fonction de leur contenu en azote. Cet élément a une teneur variant de 1 à 6% sur une base de poids sec et est présent sous des formes inorganique et organique. Les besoins de la plante sont également pris en considération. La quantité maximale de boue appliquée au sol doit être telle qu'elle n'apporte pas plus de 135 kilogrammes/hectare d'azote disponible (Saint-Yves, 1985). Cette dose peut être appliquée une fois tous les cinq ans en un ou plusieurs épandages.

En général, les boues contiennent des niveaux comparables en P et en N. Comme les besoins de la plante en phosphore sont inférieurs à ceux en N, il a été suggéré d'appliquer les boues sur la base du besoin en P de la plante cultivée plutôt que de ses besoins en azote afin d'éviter les risques de pollution ou de contamination des eaux de surface.

Outre le phosphore qui présente des risques de pollution ou de contamination des eaux, l'accumulation de produits organiques toxiques, d'organismes pathogènes et de métaux lourds peut se produire. Des enquêtes menées par Environnement Canada sur les produits organiques toxiques dans 13 boues résiduaires canadiennes ont montré des concentrations de divers produits organiques variant de 1 000 à 10 000 fois celles existant au départ dans les eaux usées. Les principaux produits organiques identifiés sont surtout des phtalates, des hydrates de carbone aromatiques polynucléés et chlorés.

TABLEAU 13 -- **Composition des boues résiduaires de quelques villes ontariennes**

Constituant	Nombre de municipalité	Concentration	
		Médiane	Gamme
En masse humide			
Matières solides totales, %	15	3,5	2,0 - 6,0
Matières solides volatiles, %	15	51	35 - 65
pH	11	7,5	7,2 - 7,8
Alcalinité en $CaCO_3$, mg/l	11	4 800	200 - 7 600
N total, mg/l	16	1 950	1 300 - 2 900
NH_4N, mg/l	16	740	270 - 1 100
En masse sèche			
P, mg/g	15	24	14 - 57
K, mg/g	10	0,09	0,04 - 0,16
Ca, mg/g	11	44	26 - 67
Mg, mg/g	13	6,8	3,1 - 11
Fe, mg/g	15	51	14 - 110
Al, mg/g	12	9,6	4,1 - 61
Na, mg/g	10	0,16	0,07 - 0,42
Cl, mg/g	11	7,1	1,67 - 190
Cd, ug/g	17	10	5,0 - 260
Zn, ug/g	17	1 600	400 - 5 130
Cu, ug/g	17	970	280 - 2 570
Ni, ug/g	17	120	23 - 410
Pb, ug/g	17	375	200 - 1 280
Cr, ug/g	16	530	100 - 9 740
Mn, ug/g	15	320	170 - 2 090
Co, ug/g	16	9,0	1,00 - 42
Mo, ug/g	12	12	1,00 - 97
Hg, ug/g	13	2,1	0,43 - 4,7

Source: Webber (1984b).

TABLEAU 14 **Analyse comparative des boues du Québec**

	C org. tot. %	NH_4^+ mg/kg	N tot. %	$NO_3^- + NO_2^-$ mg/kg
QUÉBEC	31,5	9 196	3,6	2 717
EPA	31,0	6 540	3,9	490 NO_3^-

	P tot. %	K %	Na %	Ca %
QUÉBEC	1,1	0,2	0,8	2,1
EPA	2,5	0,4	0,57	4,9

	Mg %	Ba %	Fe %	Al %
QUÉBEC	0,43	0,03	1,3	1,4
EPA	0,54	0,06	1,3	1,2

	Pb mg/kg	Zn mg/kg	Cu mg/kg	Ni mg/kg
QUÉBEC	140	483	466	27,7
EPA	1 360	2 790	1 210	320,0

	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Mn mg/kg	B mg/kg
QUÉBEC	<10	51,3	1032,0	<125
EPA	1 110	2 620,0	382,0	77

	As mg/kg	Mo mg/kg	Hg mg/kg	
QUÉBEC	6,5	12,9	2,6	
EPA	43,0	28,0	73,3	

Tiré de St-Yves, 1985.

Cependant les doses mesurées étaient faibles et il est peu probable que ces quantités puissent représenter un risque de contamination des sols et un danger réel pour la qualité des cultures ou la santé de l'homme et des animaux.

La présence d'organismes pathogènes dans les boues résiduaires et les effluents traités est possible et même probable. Peu de faits confirment la transmission de maladies par ces résidus appliqués au sol. Les seuls cas de transmission de maladies chez les humains ou les animaux ont été rapportés dans les cas d'application d'eaux usées brutes ou partiellement traitées. Il semble que peu d'organismes puissent survivre au traitement des eaux usées et à l'exposition aux conditions environnementales pour représenter un risque de maladie.

Les métaux lourds constituent probablement la principale source de contamination des sols et l'utilisation inconsidérée des boues pourrait accroître les teneurs en métaux lourds du sol et nuire aux cultures et aux animaux.

Les éléments ont été divisés en deux groupes importants: le premier contient les éléments présentant un risque peu important sur diverses bases; le second, les éléments pouvant présenter un risque important. Ainsi dans le premier groupe on retrouve Fe, Mn et Al qui ne sont pas problématiques dans les sols bien aérés et présentant des pH supérieurs à 5.5. On retrouve également les éléments: Cr, As, Se, Sb, Pb, Hg, et Co, qui ne devraient pas causer de problèmes pour les raisons suivantes: certains de ces éléments s'accumulent dans le sol sans être absorbés par les plantes; d'autres éléments s'accumulent dans les racines et ne sont pas transportés. Dans le deuxième groupe, sont classés les éléments qui constituent des risques importants soit le Zn, Cu, Ni, Mo, Cd.

Puisque ce sont les contenus du sol en ces éléments qui constituent les facteurs déterminants, il est important de connaître les niveaux en métaux lourds des boues et des sols et d'établir les charges permissibles de métaux lourds dans les sols agricoles. Le tableau 15 reflète la "qualité" des boues d'une part tandis que le tableau 16 présente les normes permissibles pour diverses provinces du Canada et pays industrialisés. Des variations assez importantes démontrent le besoin de recherche dans ces domaines.

TABLEAU 15 -- **Concentrations maximales permissibles de métaux lourds dans les boues considérées comme acceptables pour utilisation sur des sols agricoles**

	Concentration (ug/g)											
	Cd	Zn	Cu	Ni	Pb	Cr	Mn	Mo	Co	As	Se	Hg
Allemagne	20	3000	1200	200	1200	1200	--	--	--	--	--	25
Belgique	10	2000	500	100	300	500	500	--	20	10	25	10
Canada[a]	20	1850	--	180	500	--	--	20	150	75	14	5
Danemark	8	--	--	30	400	--	--	--	--	--	--	6
Finlande	30	5000	3000	500	1200	1000	3000	--	100	--	--	25
France	20	3000	1000	200	800	1000	--	--	20	--	100	10
Norvège	10	3000	1500	100	300	200	500	--	20	--	--	7
Pays-Bas	10	2000	600	100	500	500	--	--	--	10	--	10
Suède	15	10000	3000	500	300	1000	--	--	50	--	--	8
Suisse	30	1000	1000	200	1000	1000	--	20	100	--	--	10
Gamme	8	1000	500	30	300	200	500	--	20	10	14	5
	30	10000	3000	500	1200	1200	3000	--	150	75	100	25
Médiane	7	3000	1100	200	500	1000	--	20	50	--	--	10

[a] Valeurs appliquées aux boues et boues provenant d'industrie contenant 5% et moins d'azote.

Royaume-Uni - Les boues épandues sur les pâturages ne devraient pas contenir plus de 3 500mg F/kg (masse sèche) et celles épandues sur les gazons, les jardins et les terrains de jeu plus de 2 000 mg Pb/kg (masse sèche).

États-Unis - Les boues épandues sur les cultures de fruits et légumes ne devraient pas contenir plus de 25 ug/g (masse sèche) de cadnium, 1 000 de plomb et 10 de byphényles polychlorinés.

Source: Webber (1984b).

TABLEAU 16 -- **Charges maximales permissibles de métaux lourds dans les terres agricoles**

Endroit	Cd	Zn	Cu	Ni	Pb	Cr	Mn	Mo	Co	As	Se	Hg	B
	kg/ha												
Alberta	0,8	150	100-200	12-25	50-100	50-100	--	--	--	--	--	0,2-0,5	5-10
Colombie Britannique	4,0	200	--	36	100	--	--	4	30	15	2,8	1,0	--
Ontario	1,6	300	150	32	90	210	--	4	30	14	2,4	0,8	--
Canada	4,0	370	--	36	100	--	--	4	30	15	2,8	1,0	--
Allemange	8,4	750	210	60	210	210	--	--	--	--	--	5,7	--
Danemark	0,2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
États-Unis	5-	250-1 000	125-500	50-200	500-2 000	--	--	--	--	--	--	--	--
Finlande	0,1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Norvège	0,2	60	30	2	6	4	10	--	0,4	--	5	0,14	--
Pays-Bas	2,0	400	120	20	100	100	--	--	--	2	--	2,0	--
Royaume-Uni[b]	5	560	280	70	1 000	1 000	--	4	--	10	--	2,0	4,5
Suède[a]	0,075	50	15	2,5	1,6	5	--	--	0,25	--	--	0,04	--
Gamme	0,1-20	0-1 000	30-500	2-200	6-2 000	4-1 000	--	--	0,4-30	2-15	2,8-5	0,14-5,7	--
Médiane	3	500	210	60	210	210	--	4	--	10	--	2	--

a Charge en 5 ans, peut être répétée.

b La charge en B peut être de 4,5 kg/ha la première année et de 3,5 kg/ha les années suivantes

Source: Webber (1984b).

2.10.2 Pesticides

La contamination des sols par les pesticides a fait l'objet de peu de travaux de recherche au Québec. En sols organiques, les doses requises pour le contrôle des mauvaises herbes et des insectes dépassent de beaucoup celles recommandées en sols minéraux. Des chercheurs de la station de recherche d'Agriculture Canada à Saint-Jean-sur-Richelieu (Parent et Bélanger, 1985) ont montré qu'un produit comme le linuron était complètement retenu même à des concentrations beaucoup supérieures à celles normalement appliquées et que ces substances ne migraient que sur des distances de quelques centimètres seulement. En sols minéraux, l'atrazine, utilisée pour la lutte contre les mauvaises herbes, dans la culture du maïs serait le produit le plus susceptible de contaminer les sols, puisque les résidus persistent pendant plusieurs années et en quantités parfois suffisantes pour inhiber la croissance d'autres espèces cultivées.

La venue de pratiques culturales de conservation de sol comme le labour minimal, risque cependant d'accroître le problème de contamination par les pesticides. En effet, bien que cette pratique assure un meilleur contrôle de l'érosion du sol par l'eau et le vent, elle peut favoriser la croissance des mauvaises herbes et la multiplication des insectes nuisibles. C'est donc dire qu'une meilleure régie des pesticides est à prévoir si de telles pratiques se développent intensément.

Smika et Shorman (1983) ont montré l'importance de l'interrelation entre le contenu en argile, le pH, la capacité d'échange cationique et la teneur en matière organique sur l'accumulation de l'atrazine dans les sols soumis à des pratiques de labour minimal. Des vérifications devront être effectuées sous nos conditions climatiques avant que l'on puisse faire des recommandations.

Des symptômes de dérèglement de croissance ont été observés entre 1978 et 1981 sur des plantules de tabac cultivées sous serre dans la région de Saint-Jacques-de-Montcalm. Une étude (Lafontaine, 1984) contribua à faire la lumière sur les problèmes observés qui avaient été attribués à la présence de piclorame dans l'eau d'arrosage.

Le piclorame est utilisé principalement contre les plantes ligneuses et herbacées qui croissent sous les lignes hydroélectriques et à proximité des pipelines. Le piclorame, par sa mobilité et sa persistance dans le sol, peut constituer un sérieux problème s'il devait être utilisé dans des rotations de courte durée, sur des terrains en pente où existent des risques d'érosion hydrique. Le pH, le taux de matière organique, la texture et l'humidité sont les caractéristiques du sol les plus étudiées en relation avec la phytotoxicité du piclorame. Des problèmes plus nombreux et plus sérieux ont été notés plus fréquemment dans les sols sableux que dans les sols argileux car les teneurs en matière organique étant généralement plus faibles dans les sols à texture grossière. Bien qu'une diminution de pH semble accroître la toxicité de cet herbicide, aucun changement n'a été observé à des pH variant entre 4,3 et 7,5 dans les études rapportées par Lafontaine (1984).

Plusieurs essais effectués au Etats-Unis et rapportés par Lafontaine font état d'une baisse de 40% des rendements en soya par suite d'une application de 38,4 grammes/hectare de piclorame avant le semis. Appliqué à la floraison au taux de 9,6 grammes/hectare, le piclorame réduit les rendements en soya de 50%. Pour le tabac, l'application de cet herbicide à des doses aussi faibles que 1,24 gramme/hectare peu après le repiquage réduit les revenus à l'hectare de 50% alors qu'une application de 6,2 grammes/hectare amenait une réduction de 80%.

Cependant, tous les pesticides utilisés en protection des cultures ne représentent pas un danger certain pour les utilisateurs, consommateurs et l'environnement en général. Certains pesticides se décomposent tellement rapidement en produits non toxiques qu'ils ne présentent pas de danger potentiel tandis que d'autres devraient être utilisés à des doses massives pour le devenir. Il est bien évident que certains pesticides peuvent être néfastes et même demeurer actifs pendant plusieurs mois et s'accumuler dans le sol. Par contre, les problèmes de contamination par les pesticides sont souvent reliés à une utilisation abusive et non rationnelle associée à une conaissance insuffisante des ravageurs et plantes à contrôler ainsi que des techniques d'application à utiliser.

CHAPITRE 3

Importance des problèmes de la dégradation des sols et évaluation des impacts économiques au Québec

3.1 **Répartition des cultures**

La dégradation des sols se manifeste à divers degrés dans toutes les régions agricoles du Québec. Comme la détérioration des terres se produit par suite du travail intensif du sol, il devient facile de délimiter les zones les plus affectées ou susceptibles de l'être en regard des cultures qui y sont produites. D'après ces considérations, il ne fait pas de doute que les sols de la plaine de Montréal sont les plus intensément dégradés au Québec.

Les tableaux 17 à 19 regroupent les cultures principales au Québec ainsi que leur répartition géographique. Les régions agricoles de Nicolet (04), Saint-Hyacinthe (06), Châteauguay (07) et Nord de Montréal (10) s'accaparent la presque totalité de la culture du maïs-grain et environ 60% du maïs fourrager. Quant à la betterave sucrière, elle se cultive principalement dans l'Est de Montréal (06) et quelque peu dans les régions 04, 07 et 10. Dans ces régions, ce sont les cultures de graminées et de fourrages qui ont diminué pour laisser place aux cultures industrielles. Comme autres cultures sarclées pouvant être associées à la dégradation des sols, mentionnons les légumes, les pommes de terre et le tabac. Quant aux régions périphériques, le problème de la dégradation est de moindre importance car il y a prédominance de foin et de pâturages sauf pour quelques endroits des Cantons-de-l'Est et du Saguenay Lac-Saint-Jean. Il est bien évident que les cultures en rangs comportent plus de risques pour les sols que les graminées et légumineuses fourragères. Cependant de meilleures pratiques culturales ainsi qu'une régie des sols plus appropriée peuvent considérablement diminuer les risques de dégradation.

TABLEAU 17 --**Répartition régionale des superficies consacrées à la production de maïs-grain et de maïs fourrager en 1983**

Région agricole	Superficie (ha)	
	Fourrager	Grain
01- Bas Saint-Laurent, Gaspésie	1 800	
02- Québec	4 300	
03- Beauce	3 800	
04- Nicolet	13 100	19 100
05- Cantons-de-l'Est	8 000	4 700
06- Est de Montréal	19 900	88 600
07- Sud-oues- de-Montréal	15 700	50 900
08- Outaouais	7 600	3 100
09- Abititi-Témiscamingue	600	
10- Nord de Montréal	7 200	12 500
11- Mauricie	4 400	
12- Saguenay, Lac-Saint-Jean	300	

Source: C.P.V.Q. (1984)

TABLEAU 18 --**Répartition régionale des superficies consacrées à la production de pomme de terre, légumes et foin (1981)**

Région agricole	Superficie (ha)		
	Pomme de terre	Légume	Foin cultivé
01- Bas-Saint-Laurent, Gaspésie	1 900	247	126 000
02- Québec	4 100	1 406	115 000
03- Beauce	200	188	104 000
04- Nicolet	1 400	725	97 000
05- Cantons-de-l'Est	300	261	95 000
06- Est de Montréal (Richelieu)	800	8 178	72 000
07- Sud-ouest-de-Montréal	1 500	13 339	60 000
08- Outaouais	1 000	392	67 000
09- Abititi-Témiscamingue	500	36	68 000
10- Nord de Montréal	3 000	7 881	59 000
11- Mauricie	800	527	40 000
12- Saguenay, Lac-Saint-Jean	2 300	257	64 000
Total	17 800	33 437	967 000

Source: Statistique Canada (1982).

TABLEAU 19 --**Répartition régionale des superficies consacrées à la production de céréales (1981)**

Région agricole	Suprficie (ha)				
	Blé	Avoine	Orge	Grains mélangés	Total
01- Bas-Saint-Laurent, Gaspésie	1 600	25 400	10 600	7 700	45 300
02- Québec	2 000	17 500	12 300	2 000	33 800
03- Beauce	1 000	7 500	6 700	900	16 100
04- Nicolet	3 400	15 200	16 300	4 400	393 000
05- Cantons-de-l'Est	1 200	7 800	5 400	2 500	16 900
06- Est de Montréal	17 000	15 200	15 600	10 000	57 800
07- Sud-ouest-de-Montréal	9 300	13 000	10 700	9 800	42 800
08- Outaouais	1 000	9 200	2 600	3 200	16 000
09- Abititi-Témiscamingue	200	4 900	2 100	2 600	98 000
10- Nord de Montréal	2 500	12 000	10 500	5 100	30 100
11- Mauricie	1 100	8 500	8 300	1 500	19 400
12- Saguenay, Lac-Saint-Jean	600	13 900	4 800	1 300	20 600
Total	40 900	150 100	105 900	51 000	347 900

Source: Statistique Canada (1982).

3.2 **Matières organiques**

Bien que tous les sols mis en culture perdent une certaine quantité de leur matière organique (de 30 à 60% selon le type de culture), c'est dans la région de la Plaine de Montréal que les baisses d'humus sont les plus marquées. Cela s'explique par l'abandon des productions animales pour des monocultures industrielles intensives. Dès lors, les apports de matières organiques par les fumiers et les cultures de graminées et de légumineuses pour l'alimentation du bétail cessent, provoquant une diminution du pourcentage de matière organique dans les sols. Le tableau 20 donne un aperçu du contenu des sols du Québec en matière organique.

Les sols légers utlisés pour la culture des pommes de terre, du tabac et de certains légumes perdent rapidement une bonne quantité de matière organique à cause du travail excessif du sol et en raison de l'accroissement de l'activité microbienne et des phénomènes d'oxydation. Cette sensibilité peut aussi s'expliquer par le faible contenu de ces sols en argile qui a comme caractérisque de protéger l'humus contre la dégradation (Sörenson, 1967).

Il n'existe actuellement aucune étude permettant de quantifier l'impact économique de la perte de matière organique des sols.

TABLEAU 20 -- **Aperçu du contenu des sols du Québec en matière organique selon les régions**

Région	Nombre de champs échantillonnés	Matière organique (%)	Écart-type
Abitibi-Témiscamingue	41	6,1	3,6
Lac Saint-Jean	20	6,4	2,7
Charlevoix	8	6,7	3,5
Outaouais	11	4,6	1,3
Ouest de Montréal	11	5,1	1,3
Saint-Hyacinthe, Drummondville	12	3,7	0,9
Estrie	16	5,7	1,9
Québec-Beauce	19	5,9	1,7
Bas-Saint-Laurent, Gaspésie	30	5,8	3,1
Moyenne	168	5,8	3,1

Source: Paquet, A., Brisson, J.F., Pouliot, B. et J. Côté. Communications personnelles 1984.

3.3 Structure du sol

Il existe dans toutes les régions agricoles des sols dont la structure est dégradée à des degrés divers. Cette dégradation est reliée à l'espèce végétale cultivée, aux contraintes climatiques, à la nature des sols, aux habitudes des agriculteurs, aux concentrations des élevages d'animaux, à la valeur économique des terres et des revenus qui en sont retirés.

Les sols ne présentent pas tous la même sensibilité à l'affaiblissement de la structure. Les sols limoneux et sableux fins forment des agrégats peu cohérents et présentent donc une structure fragile. Ces sols ont tendance à se tasser sous l'effet des pluies, à former une croûte de battance et à retenir l'eau en surface. Leur bon état de drainage ne permet pas toujours d'accumuler une grande réserve de matière organique surtout si la couche arable est profonde. La grande sensibilité des argiles à la dégradation structurale provient du fait que les agrégats sont leurs seuls éléments structuraux. De plus, le complexe argilo-humique est considérablement affaibli lorsque le sol est humide. C'est pourquoi il supporte mal le stress de compression et de cisaillement au taux d'humidité où sont normalement effectués les passages des instruments aratoires. De plus, la quantité d'eau qu'ils doivent perdre par évaporation après que l'eau de gravité soit évacuée, est plus grande que celles des sols de texture légère, retardant d'un jour ou plus la date d'entrée au champ, période d'attente que l'agriculteur ne s'accorde pas toujours.

Au Québec, les sols utlisés pour les cultures sarclées à longue saison de végétation sont les plus sujets à la dégradation de la structure. La betterave sucrière et le maïs-grain sont celles qui risquent le plus d'affecter la structure car les semis et les récoltes sont souvent faits dans des conditions d'humidité excessive. Il en va de même pour les légumes de conserverie récoltés à maturité sans considération pour la condition du sol. Le travail excessif du sol et l'utilisation de machines trop lourdes favorisent également la détérioration de la structure peu importe le type de culture. A l'occasion, le piétinement des animaux lors d'une paissance intensive sur sol humide écrase les agrégats qui par la suite durcissent en créant des zones de structure compacte.

Il n'existe actuellement aucune donnée pouvant démontrer la relation entre la perte de structure et le rendement des cultures, il est donc impossible d'en évaluer l'impact économique.

3.4 **Compaction du sol**

Au Québec, une grande partie des Basses-terres du Saint-Laurent, spécialement les sols à texture fine développés sur les sédiments marins de la mer Champlain, sont sujets à la compaction. Parmi les sols les plus sensibles, on trouve les loams, les loams argileux et les argiles de type Sainte-Rosalie. Les sols sableux minces sur argile utilisés pour la monoculture du maïs-grain, ceux des Basses-terres du Lac Saint-Jean et de la ceinture argileuse de l'Abitibi-Témiscamingue sont également sensibles à la compaction. A l'inverse, les sols de granulométrie variée sont moins sujets au tassement.

Bien que la compaction se manifeste dans toutes les cultures telles les petits grains, foin, pâturages, etc, si la régie des sols n'est pas appropriée, elle est associée avant tout aux sols supportant des monocultures intensives en rangs tel le maïs-grain et fourrager, la betterave sucrière et les légumes de conserverie. Ces cultures dominent dans les régions agricoles 04, 06, 07 et 10.

La compaction est la forme de dégradation des sols ayant le plus grand impact économique en agriculture. Une augmentation de densité de 0,1 à 0,15 tonne/mètre cube au-dessus de l'optimum pour la croissance des plantes résulte en une baisse de rendement variant de 0 à 30% selon le type de plante et de sol (McKyes et al., 1980). En supposant que toutes les terres agricoles en culture du Québec soient modérément compactées et qu'elles subissent une baisse de rendement moyenne de 15%, le coût de la compaction s'élèverait à 100 millions de dollars annuellement (TABLEAU 21) (Mehuys, 1984). Une estimation plus optimiste placerait les coûts directs à la ferme aux environs de 30 millions de dollars par an (Agriculture Canada, 1985). Les pertes économiques réelles se situeraient quelque part entre ces deux chiffres mais il est impossible de les circonscrire avec plus de précision, car il manque des données sur l'étendue et la sévérité du problème de compaction au Québec. Il faut prendre note que tous ces chiffres ne sont le résultat que d'estimations.

TABLEAU 21 --**Coût estimatif de la compaction des sols au Québec**

Culture	Superficie (1982) (ha)	Rendement moyen (1982) (t/ha)	Prix moyen sur cinq ans (1979-1984) ($/t)	Perte de rendement (t/ha)	Perte de rendement ($/ha)	coût annuel (10^6/an)
Grain						
Blé	32 000	2,9	174	0,51	89	2,8
Avoine	163 000	1,9	155	0,34	52	8,5
Orge	121 000	3,0	150	0,53	79	9,6
Maïs	172 000	5,2	166	0,92	152	26,2
Mélange	54 000	2,6	152	0,46	70	3,8
Fourrage						
Foin	967 000	4,4	50	0,78	39	37,5
Maïs	87 000	29,9	25	5,28	132	11,5
Total						99,9

Source: Mehuys (1984).

Remarque: Une baisse de rendement de 15% a été attribuée à toutes les cultures.

3.5 Érosion hydrique

Au Québec, les études pédologiques démontrent qu'il y a dans la plupart des régions agricoles des séries de sol affectées par l'érosion. Par exemple, le loam argileux Ormstown, l'argile Rideau, le loam Yamaska, l'argile Chapeau, le loam Pontiac et le loam argileux La Pocatière sont des séries de la plaine du Saint-Laurent démontrant des signes avancés d'érosion (Dubé, 1975). Les terrains à relief ondulé à fortement vallonné des régions du Lac-Saint-Jean, des Appalaches et des Laurentides représentent 14% du territoire agricole. Toutes ces régions manifestent des signes plus ou moins graves d'érosion hydrique. La plupart des sols du Saguenay-Lac Saint-Jean montrent des signes avancés d'érosion particulièrement les sols des séries Taillon, Mistouc et Larouche (Dubé, 1975). Même les terres de la plaine argileuse comme les argiles Chicoutimi et Normandin, le loam Alma et les loams sableux Boulanger, Dolbeau et Roberval sont affectés par l'érosion des berges des ruisseaux et de canaux de drainage (Dubé, 1975). Les sols formés sur tills glaciaires de la région des Laurentides et des Appalaches sont aussi très sensibles à l'érosion en raison d'un relief fortement ondulé (ex: série Greensboro et Coaticook).

Les cultures sarclées laissant le sol nu entre les rangs lors de la période de croissance sont celles qui favorisent le plus l'érosion hydrique. La culture du maïs-fourrager ou maïs-grain et de façon moindre les céréales dans les régions à topographie accidentée représentent les risques extrêmes d'érosion. Également, les sols de la plaine du Saint-Laurent voient leur potentiel d'érosion s'accroître en raison d'une structure dégradée et d'un niveau de compactage élevé.

Mehuys (1984) a estimé à environ 11 millions de dollars par an les coûts de l'érosion hydrique en milieu agricole sur les terres vallonnées (TABLEAU 22). L'évaluation des coûts directs basée sur la baisse de rendement demeure très spéculative car elle repose sur des suppositions et hypothèses difficilement vérifiables. Les coûts indirects qui regroupent le nettoyage des fossés, l'augmentation du coût du traitement des eaux, etc., seraient aussi élevés que les coûts directs. Pour plus de précision, la perte de nutriments dans les eaux de ruissellement devrait être ajoutée à ces coûts. Sur les sols à topographie plane, aucune réduction de rendement n'est attribuable à l'érosion hydrique. Les coûts sont seulement imputables au nettoyage des fossés, à l'entretien des cours d'eau et aux dommages environnementaux. Cependant, ces derniers tout en étant réels sont difficilement évaluables.

A ces coûts, s'ajoutent ceux de l'érosion hydrique en sols organiques (Mehuys, 1984). L'érosion cause principalement l'effondrement des talus des fossés et des rigoles au moment de la fonte des neiges. Elle est en partie responsable du remplissage des fossés quoique difficilement séparable de l'érosion éolienne. Le nettoyage des fossés et des cours d'eau sur l'ensemble des sols organiques peut atteindre 80 kilomètres/an. Avec une estimation conservatrice de 3,50 dollars/mètre pour le nettoyage des voies d'eau, il faut ajouter une somme additionnelle de 300 000 dollars annuellement imputable à l'érosion hydrique des sols organiques.

TABLEAU 22 **--Estimation spéculative du coût de l'érosion hydrique au Québec dans les régions agricoles présentant une physiographie défavorable associée aux pentes raides ou au relief vallonné**

Classe de sol	Superficie avec sous-classe "T" (ha)	Proportion de ces terres en culture (1) (%)	Terres sous culture (ha)	Coûts de la perte de rendement (2) ($/an)	Coûts indirec (3) ts ($/an)
1T	0				
2T	34 000	75	25 000	1 150 000	
3T	197 000	20	40 000	1 800 000	
4T	497 000	10	50 000	2 300 000	
Total	728 000		115 000	5 250 000	5 250 000

Source: Mehuys (1984).

(1) Estimation

(2) Hypothèses: 10% des terres en culture sont sévèrement érodées et ont enregistré une perte de rendement de 35%; 20% sont modérément érodées avec une réduction de rendement de 10%; basé sur un rendement normal en maïs-grain de 5 t/ha avec un prix de 166$/t.

(3) Présumé que les coûts indirects sont aussi élevés que les coûts directs

3.6 Érosion éolienne

L'érosion éolienne s'observe particulièrement dans les régions où le climat est sec et où les sols sont sableux et de texture fine. Au Québec, l'incidence de l'érosion éolienne en sols minéraux est faible car les précipitations sont distribuées régulièrement tout au long de l'année limitant ainsi les risques que les sols découverts s'assèchent suffisamment pour être emportés par le vent. Les sols minéraux les plus sensibles seraient les loams sableux, les sables loameux et les sables contenant moins de 7% de matière organique. Les particules plus grosses que le sable fin sont suffisamment lourdes pour résister à la force des vents dominants et les plus petites tendent à s'agglutiner et à former des agrégats. Toutefois, tous les types de sols peuvent être érodés s'ils sont suffisamment secs ou si le vent est assez fort. A l'inverse, les loams, les loams limoneux et les loams limono-argileux contenant de 20 à 30% d'argile et des particules de limon de 0,005 à 0,01 millimètre offriraient le plus de résistance à l'action des vents. Par contre, les sols organiques en culture sont très vulnérables à l'érosion éolienne en raison de la légèreté de leurs particules et à l'absence complète de structure.

Au Québec, malgré l'absence de statistiques, certains chercheurs (Parent et al, 1980) estiment à plusieurs milliers d'hectares la superficie de terres sensibles à l'érosion éolienne, la grande majorité occupant les terrasses marines et les deltas de nos rivières. Les régions les plus affectées sont le Sud de Montréal, Joliette, L'Assomption, Nicolet, Portneuf, Lac-Saint-Jean Nord, Kamouraska, Rivière-du-Loup, Baie-des-Chaleurs et les Iles-de-la-Madeleine. Ces régions sont occupées principalement par la production de légumes, de pommes de terre et de tabac.

L'impact économique de l'érosion éolienne sur sols minéraux n'a pas été évalué au Québec. Cependant sur sols organiques, le vent emporte en moyenne 1 centimètre/an de la couche arable sur les sols les plus sensibles (700 ha) et 0,5 centimètre/an sur les autres (6 300 hectares) (Mehuys, 1984). Cela représente un volume de près de 400 000 mètres cubes de matériel organique perdu chaque année. La destruction des semis au printemps représente une perte importante pour le producteur. En sol organique profond, la perte de 1 centimètre/an de sol n'affecte pas la fertilité des terres mais ce genre d'érosion emporte les graines de semence. Cela inclut les cultures de carottes, oignons, laitues et radis. Les pertes attribuables aux semences et au travail supplémentaire sont estimées à 250 000 dollars. De plus, on peut également ajouter 150 000 dollars pour la réduction des rendements provoquée par un semis plus tardif et/ou une récolte de moindre valeur pour un grand total de 400 000 dollars (Mehuys, 1984).

A titre d'exemple, au printemps 1985, des dizaines de maraîchers de la région de Sherrington ont dû réensemer quelques 1 200 hectares de légumes à cause des vents violents qui ont détruit les semis. Les pertes se sont élevées à près de 375 dollars/ hectare pour un coût total évalué à 500 000 dollars.

3.7 **Acidité des sols**

Les sols acides se retrouvent partout au Québec, sauf dans quelques régions de sols argileux d'origine marine. C'est particulièrement le cas des sols plutôt minces développés sur les dépôts de till glaciaire composé de roches granitiques.

Les sols les plus sensibles à l'acidification sont ceux susceptibles au lessivage, ayant un faible pouvoir tampon et sur lesquels il y a de forte application d'engrais azotés. Parmi ceux-ci, les sols sableux utilisés pour la production de maïs et de pommes de terre se retrouvent en-tête de liste.

Les cultures exigeantes en azote telles le maïs et les prairies de graminées contribuent le plus à l'acidification des sols. Les plantes les plus affectées par l'acidité sont l'orge, la betterave, la laitue et le mil en raison d'une grande sensibilité à la présence d'éléments toxiques.

Une carte sur la sensibilité des sols agricoles aux dépôts acides pour l'Est du Canada a été publiée par Coote et al., (1982). Cette carte classe les sols agricoles en trois catégories différentes selon les quantités de bases échangeables qu'ils contiennent (TABLEAU 23) car ces dernières reflètent les capacités des sols à neutraliser l'acidité apportée par les précipitations. Selon ces auteurs, les sols sensibles (moins que 6 meq/100 g) perdent plus de 25% de leurs bases échangeables sur une période de 25 ans. Ils supposent qu'au cours de cette période les dépôts acides apporteront 1,5 milliéquivalent (meq) d'ions hydrogènes (H^+) par 100 grammes de sol et qu'ils déplaceront la même quantité de bases échangeables sur les sites d'échanges du sol. Les sols modérément et non sensibles perdent respectivement de 10 à 25% et moins de 10% de leurs bases échangeables. Selon cette classification, 25% des sols agricoles du Québec sont sensibles aux dépôts acides. Cependant, elle n'indique pas si ces dépôts ont des impacts sur les sols.

Le coût de l'acidification des sols, que ce soit par les pluies acides ou les engrais chimiques, se mesure en pratique par les quantités de chaux nécessaires au maintien du pH à un niveau optimal pour la croissance des plantes et non sur les baisses de rendement.

Le coût en pierre à chaux servant à neutraliser l'acidité des dépôts acides est négligeable comparativement aux quantités appliquées. En effet, les quantités requises sont de l'ordre de 35 kilogrammes/hectare/an (Coote et al, 1981) et, si le prix de la chaux est de 18 dollars/tonne, le coût total s'élève à 3,15 dollars/hectare pour une période de 5 ans.

Selon de Grandmont (1982), 2 tonnes de chaux par hectare sont requises tous les 5 ans sous un régime de culture normal pour le maintien du pH à un niveau approprié. Si l'on se réfère à la superficie totale en céréales et en productions fourragères (1 650 000 ha en 1982) on devrait utiliser annuellement 660 000 tonnes de chaux pour la correction de l'acidité. Cependant, il s'est utilisé la même année 430 000 tonnes de chaux. La différence entre les quantités utilisées et requises (230 000 t) représente le coût de l'acidification des sols et serait de 4,14 millions de dollars

(Mehuys, 1984). Si l'on avait inclus toutes les autres cultures, le montant serait encore plus élevé.

TABLEAU 23 -- **Sensibilité des sols aux précipitations acides**

DEGRÉ DE SENSIBILITÉ	CARACTÉRISTIQUE
INSENSIBLE	
(bases échangeables plus grandes que 15 meq/100 g)	Tous les sols calcaires Loam (pH supérieur à 5,5) Sols argileux (pH supérieur à 5,0)
MODÉRÉMENT SENSIBLE	
(bases échangeables entre 6 et 15 meq/100 g)	Sols sablonneux (pH supérieur à 5,5) Loam (pH entre 5,0 et 5,5) Sols argileux (pH entre 4,5 et 5,0)
SENSIBLE	
(bases échangeables plus petites que 6 meq/100 g)	Sols sablonneux (pH plus bas que 5,5) Loam (pH plus bas que 5,0) Sols argileux (pH plus bas que 4,5)

Source: Coote et al., (1982).

3.8 Drainage

La majorité des Basses-terres du Saint-Laurent où est concentrée la production agricole, présente des conditions de nappe phréatique élevée ou d'humidité excessive au printemps et à l'automne. Les besoins en drainage de ces terres s'expliquent par: 1) la précipitation annuelle qui dépasse de beaucoup l'évaporation; 2) la grande partie des terres fertiles qui est composée de sols argileux et plats ayant une faible conductivité hydraulique, et leur topographie plane qui restreint le gradient hydraulique vers les rivières et les cours d'eau. Il est à noter que la majorité des sols de classe 2 et 3 des Basses-terres du Saint-Laurent ont comme facteur limitatif un excès d'eau. De plus certains terrains, peu importe leur texture, peuvent également présenter tout au cours de l'année une nappe phréatique élevée en raison de leur configuration, soit au bas d'une pente ou lorsque leur élévation est faible par rapport aux émissaires.

Les principaux coûts associés au drainage souterrain proviennent du colmatage des drains par l'hydroxyde de fer dans les sols sableux et le drainage excessif des sols à texture grossière (Mehuys, 1984). En ce qui concerne le colmatage, il n'existe aucune solution pour remédier au problème sauf le remplacement complet des drains. Une enquête menée sur 14 fermes de la région de Nicolet, a démontré que 50% des drains avaient été bloqués par l'hydroxyde de fer après 10 ans de fonctionnement (Asselin, 1985b). Si l'on suppose que 20% des 200 000 hectares de sols sableux sont drainés souterrainement, il faudrait remplacer annuellement les drains sur une superficie de 2 000 hectares pour un coût total d'environ 2 millions de dollars (Mehuys, 1984).

Le drainage souterrain excessif des sols à texture grossière possédant une faible capacité de rétention en eau a un impact économique car il contribue à la baisse de rendement des cultures. Dans les régions de Sorel et de Saint-Hyacinthe, on estime à 100 000 hectares les superficies affectées par une sécheresse saisonnière. De ces sols, environ 3000 hectares possèdent un drainage excessif. Pour pallier à ce problème, on peut fermer quelques lignes de drain pour contrôler la nappe phréatique ou utiliser l'irrigation souterraine, où l'eau est pompée à l'intérieur des drains. L'installation de la chambre de contrôle de la nappe phréatique et la modification du système de drainage coûtent environ 200 dollars/hectare pour un investissement total de 600 000 dollars. Dans le cas de l'irrigation souterraine, il faut ajouter 100 dollars/hectare pour le système de pompage. Des augmentations de rendement de l'ordre de 0,75 tonnes/hectare en maïs-grain ont été rapportées pour le drainage contrôlé et de 2,0 tonnes/hectare avec l'irrigation souterraine (Broughton, 1984). Si le prix du maïs-grain est de 166 dollars/tonne, le coût annuel de la baisse en rendement s'élève à près de 400 000 dollars dans le premier cas. S'il y a suffisamment d'eau disponible pour permettre l'irrigation souterraine, 600 000 dollars additionnels peuvent être réalisés en augmentation de rendement. Cependant, le coût réel du drainage excessif est probablement inférieur à ces estimations étant donné que l'on ne tient pas compte des coûts supplémentaires de récolte, de séchage, d'entreposage et de transport. D'autre part, ces 3 000 hectares ne sont pas nécessairement en maïs-grain tous les ans (Mehuys, 1984).

3.9 Affaissement des sols organiques

L'affaissement des sols organiques entraîne un coût réel pour chacune des exploitations selon la valeur du sol et des récoltes produites, la profondeur et le taux de l'affaissement enregistré.

Dans le sud-ouest du Québec, la valeur des sols organiques est d'environ 13 000 dollars/hectare. Le taux d'affaissement moyen est de 1 à 2 centimètres/an. Cependant des études plus récentes montrent que ce taux pourrait atteindre parfois 7 centimètres/an (TABLEAU 24). Plusieurs dépôts ont 1 mètre ou moins de profondeur et très peu d'entre eux dépassent 2 mètres. Avec un taux d'affaissement de 2 centimètres/an, plusieurs sols organiques en production maraîchère présentement ne seront plus des sols organiques d'ici 30 à 50 ans. En supposant une durée de vie utile de 50ans en production, la perte de 2 centimètres/an d'un dépôt organique d'un mètre coûte annuellement 260 dollars/hectare pour un total de 1 820 000 dollars à la valeur actuelle des terres. Cependant, cette estimation ne tient pas compte de la valeur marchande résiduelle des terres.

TABLEAU 24 --**Changement de niveau des sols observé à certains sites cultivés et boisés au sud-ouest du Québec, de 1975 à 1978**

	SITE	CHANGEMENT DE NIVEAU (cm/an)
Cultivé:	A	-5,0
	B	-7,0
	C	-3,0
	D	-0,7
	E	-2,3
	moyenne	-3,6
Boisé:	A	-3,3*
	B	+1,7
	C	+1,0
	D	+1,7
	E	+0,7
	moyenne	+0,6

Source: Campbell et Millette (1981).

* Bien que ce site soit boisé, la proximité de fossés de drainage a abaissé la nappe phréatique sous les niveaux normaux, ce qui explique le taux assez élevé d'affaissement.

3.10 Contamination des sols

Au Québec, il existe peu de centres de traitements des eaux usées et l'épandage des boues ne représente que 8% de la production (Webber, 1984a). Il n'y a donc pas de problèmes de contamination des sols par les boues. Cependant, avec les investissements prévus de 6,4 milliards de dollars que le gouvernement du Québec effectuera dans le domaine de l'assainissement des eaux au cours des prochaines années, il est à prévoir qu'au moins 300 des 1 700 municipalités du Québec seront équipées à court terme de postes d'épuration, ce qui devrait permettre de récupérer 380 000 tonnes/an de boues résiduaires (J. Turcotte, communication personnelle 1985). Certaines compagnies ont également entrepris des démarches afin de récupérer les matériaux en suspension dans leurs eaux usées. La compagnie de papier Reed à Québec est un exemple: le bassin de sédimentation et le clarificateur permettent de récupérer annuellement quelque 150 000 mètres cubes de résidus de pâte de papier (Mario Goulet ing. à Cie Reed, communication personnelle 1985) qui seraient autrement déversés dans les cours d'eau avoisinants. Étant donné les quantités importantes de boue qui seront récupérées dans les années à venir, les besoins de recherche dans le domaine de la caractérisation de ces matériaux et des sols du Québec sont pressants.

Quant à la contamination des sols par les pesticides et par les métaux lourds transportés par les dépôts secs, elle demeure un problème potentiel. La recherche est insuffisante au Québec dans ces domaines et ne permet pas de quantifier l'impact de ces formes potentielles de pollution sur les sols agricoles.

TABLEAU 25 -- **Estimation du coût annuel direct (minimum et maximum) de la dégradation des sols au Canada**

Province Nature de la dégradation	Maritimes	Québec	Ontario	Prairies	Colombie Britanique
	million de dollars				
Perte de matière organique et affaiblissement de la structure	--	--	--	--	--
Compaction	18/18	30/100	7/71	--	6/12
Érosion hydrique	21/29	5/17	68/157	155/155	17/24
Érosion éolienne	négligeable	1/2	1/8	213/213	2/2
Acidification	--	4	--	--	--
Drainage souterrain	--	3	--	--	--
Affaissement des sols organiques	--	2	--	--	--
Contamination	--	--	--	--	--
Total	39/47	46/119	140/236	368/368	25/38

- Pas d'estimation

Source: Mehuys (1984).
Agriculture Canada (1985)
Driver et Wall (1982).

3.11 Synthèse de l'impact économique de la dégradation des sols au Québec

A l'heure actuelle, il est difficile d'évaluer avec exactitude l'impact économique de la dégradation. Les données à ce jour ne concernent que les coûts directs de la dégradation. Quant à celles sur les coûts indirects et sur les dommages environnementaux, elles n'existent tout simplement pas. Cependant, aux États-Unis et en Ontario, on rapporte que ces coûts indirects sont supérieurs aux coûts directs à la ferme (Clark et al., 1985 et Driver et Wall, 1982). On peut donc supposer que la même situation prévaut au Québec. Le tableau 25 résume l'ensemble des coûts estimatifs dans ce texte de même que ceux de la dégradation des autres provinces du Canada. Les coûts réels sont probablement plus élevés parce qu'ils doivent tenir compte de tous les coûts indirects et de toutes les formes de dégradation des sols.

CHAPITRE 4

Contrôle de la dégradation des sols

Le but des pratiques de conservation vise le maintien des rendements à un niveau élevé, la réduction des pertes de sol, de pesticides et de nutriments à un niveau acceptable, la préservation de la qualité de l'eau, l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol et l'assurance d'un revenu satisfaisant au producteur.

Étant donné les fortes relations entre les diverses formes de dégradation, certaines méthodes de lutte s'appliquent à plusieurs types de dégradation. Le tableau 26 résume les principales méthodes de lutte pour freiner ou prévenir la dégradation des sols. Plusieurs de ces techniques ont déjà fait leurs preuves au Québec tandis que d'autres utilisées dans certaines provinces avoisinantes ou aux États-Unis, devront faire l'objet d'essais plus poussés sous nos conditions.

TABLEAU 26 **Résumé des principales méthodes de lutte pour freiner ou prévenir la dégradation des sols**

TYPES DE DÉGRADATION	GESTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE	ROTATION DES CULTURES	TRAVAIL MINIMAL DU SOL	CULTURE SANS TRAVAIL DU SOL	CULTURES CULTURALES DE CONSERVATION	CIRCULATION LIMITÉE SUR BILLON ASSOCIÉE AUX PRATIQUES	PROFONDEUR DE LA COUCHE ARABLE ET DE LA VARIATION DE LA CHARGE	CHAULAGE	CULTURE DE COUVERTURE	CULTURE EN TRAVERS DE LA PENTE	VOIE D'EAU ENGAZONNÉE	TERRASSES	BRISE VENT	CONTRÔLE DE LA NAPPE PHRÉATIQUE	IRRIGATION DE SURFACE	INHIBITEUR ENZYMATIQUE	APPORT DE SOL MINÉRAL	RÉGIE DE L'ACTIVITÉ EN SOLS ORGANIQUES	RÉGIE DE PRATIQUES CULTURALES	UTILISATION DES PESTICIDES	ÉPANDAGE DES BOUES	DRAINAGE RATIONNELLE DES	CORRECTIFS ASSOCIÉS AUX PROBLÈMES DE DRAINAGE DE SURFACE	CORRECTIFS ASSOCIÉS AUX PROBLÈMES DE DRAINAGE SOUTERRAIN	CREUSAGE DES FOSSÉS ET COURS D'EAU	CORRECTIFS ASSOCIÉS AUX PROBLÈMES DE	CORRECTIFS ASSOCIÉS AUX PROBLÈMES DE
PERTE DE MATIÈRE ORGANIQUE	✪	✪	✪	✪	✪		✪		✪												✪							
PERTE DE STRUCTURE	✪	✪	✪	✪	✪	✪		✪	✪												✪							
COMPACTION	✪	✪	✪	✪	✪	✪															✪							
ÉROSION HYDRIQUE	✪	✪	✪	✪	✪				✪	✪	✪	✪	✪								✪							
ÉROSION ÉOLIENNE	✪	✪	✪	✪	✪				✪		✪			✪						✪	✪							
ACIDIFICATION DES SOLS								✪																				
PROBLÈMES RELIÉS AUX ACTIVITÉS DE DRAINAGE																	✪							✪	✪	✪		
AFFAISSEMENT DES SOLS ORGANIQUES																	✪	✪	✪		✪							
CONTAMINATION DES SOLS	✪							✪														✪	✪					

4.1 Gestion de la matière organique du sol

Dans un sol cultivé, les micro-organismes minéralisent annuellement entre 700 et 1 000 kilogrammes d'humus à l'hectare par minéralisation sans compter les pertes reliées au travail du sol. Il faut donc fournir au sol des apports de matière organique pour maintenir un niveau satisfaisant d'humus qui contribue à la fertilité et à la productivité du sol. L'objectif de ces applications ne vise pas seulement à augmenter la quantité d'humus stabilisé, mais à fournir une matière organique fraîche facilement décomposable qui assure une action immédiate sur la vie microbienne et les propriétés physiques du sol.

L'incorporation d'amendements organiques exerce un grand rôle sur la stabilité structurale. Sans elle, il n'y a pas de cimentation et de stabilisation de la structure. Lors du processus de décomposition de la matière organique fraîche, apparaissent des produits transitoires variés tels que des substances gommeuses et mucilagineuses, des corps microbiens et du mycélium. Ces substances et organismes stabilisent la structure en diminuant la mouillabilité des agrégats de sol. Toutefois, cet effet n'est que de courte durée comparativement à l'humus stable, dont l'effet sur la stabilité structurale est moins intense quoique plus durable. Ainsi, les sols bien pourvus en matière organique offrent une résistance accrue au compactage et à l'érosion. Cependant, plusieurs caractéristiques doivent être prises en considération pour un choix judicieux d'amendements.

4.1.1 Qualité des amendements organiques

4.1.1.1 Coefficient isohumique

Le coefficient isohumique représente la quantité d'humus formée par kilogramme de matière sèche apportée au sol. Chaque amendement possède un coefficient spécifique dont il faut tenir compte lors des applications de matière organique. Soltner (1982) a évalué les coefficients isohumiques de certains amendements organiques:

Fumier	0,4 à 0,5
Paille (engrais verts âgés)	0,2 à 0,25
Luzerne	0,25
Résidus de récoltes	0,15 à 0,2
Engrais verts jeunes	0,1 à 0,15

Le coefficient élevé du fumier par rapport aux autres sources d'amendement s'explique par le fait que le fumier a déjà subi une transformation microbienne. En l'absence de cette transformation, le coefficient aurait été semblable aux autres.

4.1.1.2 Rapport carbone-azote (C/N)

La valeur des amendements comme source de matière organique dépend aussi du rapport C/N. Lorsque le rapport C/N est élevé, la population bactérienne du sol devient très active et requiert une grande quantité d'azote comme source de nutriment. S'il n'y a pas d'apport extérieur en azote, les micro-organismes utiliseront l'azote du sol comme source de nourriture aux dépens des plantes. Il est donc nécessaire, dans les cas où le rapport C/N de l'amendement est élevé, d'ajouter au sol un engrais azoté pour amener une décomposition rapide et complète de l'amendement sans nuire à la fertilité du sol.

4.1.1.3 Vitesse de décomposition

La vitesse de décomposition de la matière organique varie selon les types d'amendements. En effet, pour un même nombre d'années depuis l'enfouissement, la quantité résiduelle de matière organique varie grandement (TABLEAU 27). Cette vitesse de décomposition fait intervenir le temps en années (t) et l'âge initial apparent du matériel organique (a) (Janssen 1984). Cet âge est relié au coefficient d'humification et varie de 1 an pour les engrais verts jusqu'à 14 ans pour certaines formes de tourbe. Donc, plus l'âge apparent du matériel organique est jeune, plus rapide est sa décomposition.

TABLEAU 27 -- **Matière organique résiduelle produite par l'addition au sol de divers amendements organiques et âge initial apparent**

Amendement	Années depuis l'enfouissement					Age initial apparent (année)
	0	1	3	4	8	
	(en %)					
Engrais vert	100	20	7	4,5	3	0,99
Paille	100	38	18	14	10	1,41
Litière	100	57	34	23	14	2,28
Fumier de ferme	100	60	33	25	19	2,45
Sciure de bois	100	75	54	40	27	3,69
Tourbe 3	100	85	71	61	51	5,47
Tourbe 1	100	96	90,5	86,5	82	13,62

Source: Janssen (1984).

4.1.1.4 Teneur en matière sèche

Il faut considérer que la plupart des amendements contiennent une quantité plus ou moins élevée d'eau. Plus le pourcentage d'humidité d'un amendement est faible, plus élevée est la quantité de matière sèche apportée au sol. Par exemple, un engrais vert peut contenir moins de 20% de matière sèche comparativement à de la paille qui peut en contenir jusqu'à 90%. Les valeurs attribuables aux fumiers varient selon qu'ils sont liquides ou solides, avec ou sans paille et entreposés sur plate-forme avec ou sans muret. Le tableau 28 indique la teneur en matière sèche de différents fumiers, réflétant les conditions des élevages au Québec.

4.1.2 Résidus de culture

Les déchets organiques laissés au sol par la culture précédente sous forme de feuilles, tiges et racines apportent annuellement entre 500 et 800 kilogrammes/hectare d'humus et même davantage en très bonne culture (TABLEAU 29). Cependant les résidus aisément fermentescibles (engrais vert) ne forment que très peu d'humus comparativement à celles contenant de la lignine (paille).

En plus de fournir de la matière organique, les résidus de culture et les paillis augmentent la rugosité de la surface du sol s'ils ne sont pas enfouis trop profondement par les labours. Les résidus maintenus en surface atténuent les phénomènes d'érosion hydrique en favorisant l'infiltration de l'eau et en diminuant le volume et la vitesse du ruissellement. Ils réduisent aussi la vitesse du vent en surface et absorbent une grande partie de son énergie. La protection est d'autant plus efficace que les débris végétaux sont abondants et à la verticale. La quantité de résidus requis pour protéger le sol varie selon l'intensité du vent, la quantité de particules sensibles à l'érosion, l'humidité du sol, la grandeur et la topographie du champ. Pour les sols de texture moyenne, 3 750 kilogrammes/hectare de paille fournissent une bonne protection contre l'érosion éolienne. Pour les sables et les argiles, des quantités plus grandes sont nécessaires pour une protection appropriée. La neige retenue par ces pailles ou résidus protège également le sol de l'érosion par le vent.

TABLEAU 28 -- **Contenu en matière sèche des fumiers et lisiers**

Espèce animale	Matière sèche	Éléments majeurs		
		N total	P_2O_5	K_2O
	(%)	(en kg/1000 kg de matière sèche)		
Bovins laitiers				
Fumier				
1) Sur plate forme	25	5	2	5
2) Plate-forme avec muret (piston)	15	3	2	3
Purin	7	3	0	7
Lisier	7	4	2	4
Bovins de boucherie				
Fumier (parquet)	30	5	3	6
Lisier (fosse)	8	5	2	4
Porcs				
Lisier (fosse anaérobie)	3	3	2	2
Volailles				
Fumier (déjection)	34	10	8	3
Fumier (avec litière)	70	17	18	13
Lisier dense	25	14	11	6
Lisier dilué	10	6	4	2
Diverses espèces				
Chevaux (avec litière)	22	7	3	5
Moutons (avec litière)	31	7	8	11
Chèvres (avec litière)	35	10	5	12
Lapins (solide)	57	11	11	6
(lisier)	3	2	2	2

Source: Dubé (1983).

N.B. La valeur fertilisante est une moyenne reflétant les conditions des différents élevages au Québec; elle ne sert qu'à des fins d'information générale et de calculs macro-économiques.

4.1.2.1 Importance des racines comme amendement

Les résidus et les fibres des racines laissés dns le sol par les plantes fournissent une quantité de matière organique appréciable. En général, on considère que le poids sec des racines et des parties aériennes des plantes s'équivalent. Le tableau 29 indique les quantités de matière organique apportées par les racines et les parties aériennes de diverses cultures.

Les racines, en s'introuisant à peu près partout dans le sol, distribuent uniformément la matière organique dans tout le profil. Les prairies de graminées et de légumineuses, dont les racines nombreuses et fines sont bien réparties dans le sol, améliorent et stabilisent la structure rapidement. Ce sont les plantes herbagères qui apportent le plus d'humus par leurs racines.

4.1.2.2 Les engrais verts

Les engrais verts sont des plantes à croissance rapide destinées à être enfouies pour améliorer les propriétés physiques du sol et l'enrichir en humus. Les engrais verts de courte période végétative et aisément fermentescibles n'apportent que très peu d'humus au sol. Ils sont une source de matière organique fraîche et procurent une action immédiate sur l'activité microbienne, les propriétés physiques et la fertilité du sol, grâce aux produits transitoires formés au cours de leur décomposition. Les principaux engrais verts utilisés au Québec sont le sarrasin, le millet et l'herbe du Soudan. Les deux graminées ont un système radiculaire très développé et peuvent être semées au mois de juin. Pour obtenir la plus grande masse végétale possible, il faut épandre les engrais recommandés selon l'analyse du sol. Avant l'enfouissement, il faut ajouter de l'azote pour faciliter la décomposition de l'engrais vert. De plus, le semis d'une céréale d'automne comme le seigle qui sera enfouie le printemps suivant apportera une certaine quantité d'humus et protégera le sol contre l'érosion pendant l'hiver et au début du printemps. Toutefois, le semis de la céréale d'automne ne permet pas toujours une bonne implantation sous nos conditions climatiques.

4.1.3 Apports externes

4.1.3.1 Fumiers

Les fumiers sont généralement considérés par les producteurs uniquement pour leur valeur fertilisante mais leur apport d'humus est tout aussi important quoique souvent oublié. La matière sèche des fumiers solides, se compose en majeure partie de matière organique. Leur enfouissement contribue à l'élévation du taux de matière organique (FIGURE 7) ainsi qu'à l'amélioration des propriétés physiques du sol et en particulier de la structure (TABLEAU 30). Leur action à court terme sur la stabilité structurale est faible, mais relativement forte à long terme.

TABLEAU 29 --Quantité d'humus produites à l'hectare par les résidus de diverses cultures selon le rendement des récoltes

Cultures	Racines							Parties aériennes						
	K	Rendement						K	Rendement					
		Moyen		bon		très bon			moyen		bon		très bon	
		M. S. (ha)	humus kg/ha	M.S. t/ha	humus kg/ha	M.S. t/ha	humus kg/ha		M.S. t/ha	humus kg/ha	M.S. t/ha	humus kg/ha	M. Ss t/ha	humus kg/ha
Betterave sucrière	0,15	0,8	120	1,0	150	1,2	180	0,08	4,0	320	5,0	400	6,0	480
Pomme de terre	0,15	0,8	120	1,0	150	1,2	180	----	---	---	---	---	---	---
Maïs-grain	0,15	2,0	300	3,0	450	4,0	600	0,12	4,0	480	6,0	720	7,0	840
Luzerne (par an)	0,2	2,0	400	3,0	600	4,0	800	0,12	1,0	120	2,0	240	3,0	360
Pois conserve	0,15	1,5	225	2,0	300	2,5	375	0,08	2,5	200	3,5	280	4,0	320
Blé	0,15	2,0	300	2,5	375	3,0	450	0,15	4,0	600	5,0	750	6,0	900
Orge	0,15	1,0	150	1,5	225	2,0	300	0,15	2,5	375	3,5	525	4,0	600
Engrais et légumes	0,15	0,8	120	1,0	150	1,2	180	0,08	3,0	150	4,0	200	5,0	250
Engrais vert "avancé"	0,15	1,0	150	1,5	225	1,8	270	0,08	4,0	320	5,0	400	6,0	480

K = coefficient isohumique; M.S. = matière sèche

Source: Soltner (1982).

4.1.3.2 Copeaux de bois

Des recherches effectuées par Dubé (1983), ont démontré que l'incorporation au sol de copeaux de bois provenant de l'émondage d'arbres feuillus a pour effet d'accroître le contenu en matière organique de la fraction du sol passant à travers le tamis de 2 millimètres. De plus, le rapport C/N du sol augmente légèrement avec les doses de copeaux (TABLEAU 21).

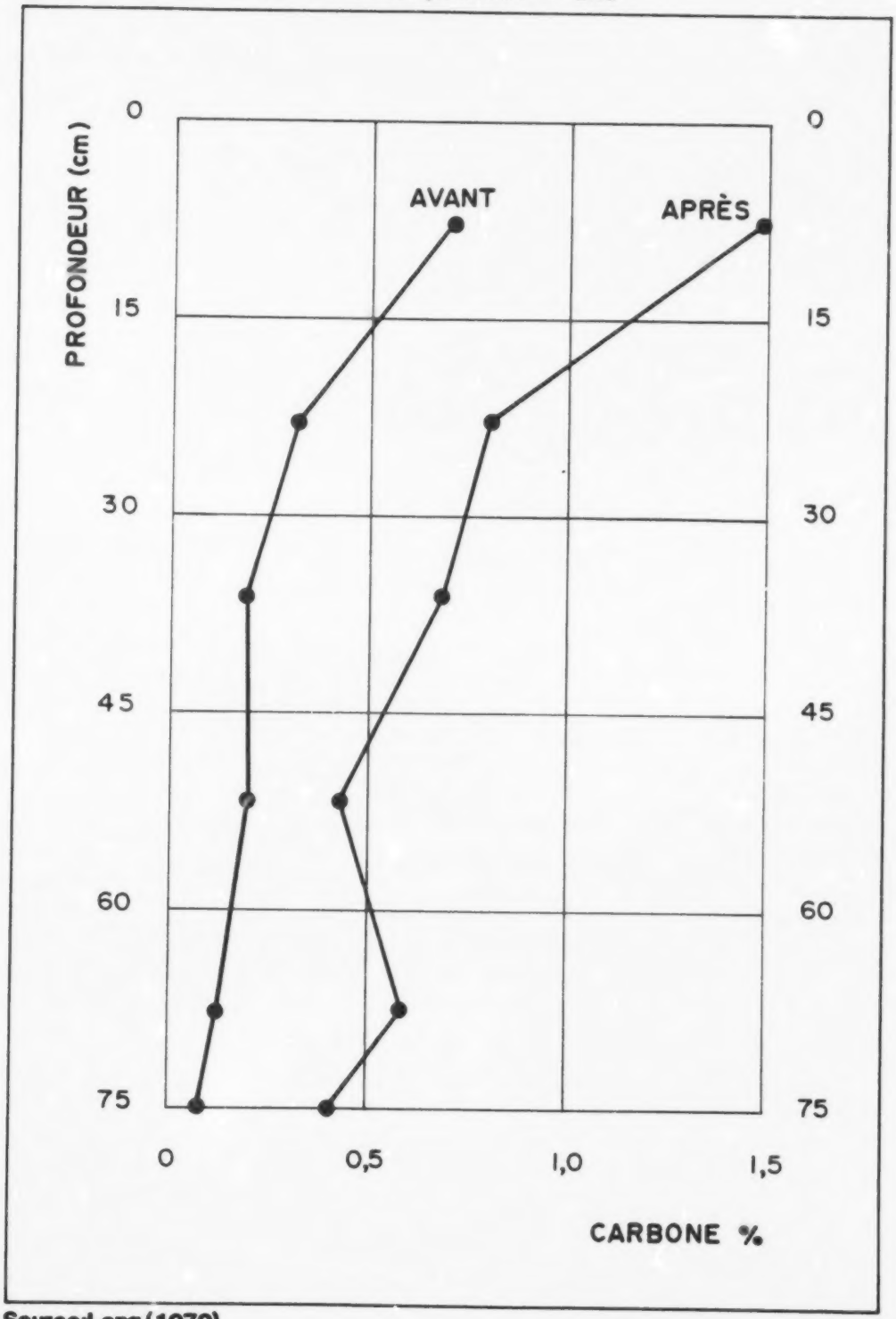
Cependant, l'utilisation de copeaux de bois renfermant une forte quantité de matière ligneuse riche en carbone, risque de créer une immobilisation de l'azote du sol au détriment des plantes cultivées. L'utilisation du lisier de porc comme source d'azote en mélange avec les copeaux de bois peut prévenir ce problème (Dubé, 1983).

TABLEAU 30 --**Effet de 20,2 t/ha de fumier, appliquées tous les 2 ans sur une culture de mélilot, sur la grosseur des agrégats stables à l'eau (Michigan)**

Grosseur des agrégats (mm)	Agrégat stable à l'eau	
	Témoin (%)	Mélilot + fumier (%)
4	8,2	20,8
4 - 2	7,6	12,0
2 - 1	9,3	11,8
1 - 0,5	12,4	15,8
0,5 - 0,25	23,7	17,5
0,25 - 0,10	4,1	2,5
Total 0,10	65,3	80,4
Total 0,5	37,5	60,4

Source: Benne et al. (1961).

FIGURE 7 **Effet sur le carbone de l'application de 45t/ha/an de fumier de bovin pendant 4 ans**



Source:Long,(1979).

TABLEAU 31 -- **Effet des apports de copeaux et de lisier sur la teneur en matière organique et le rapport C/N**

TRAITEMENT (ha)	MATIÈRE ORGANIQUE (%)	RAPPORT C/N
Témoin	3,6	14,9
Copeaux 25 t	4,5	17,6
50 t	4,6	16,8
100 t	5,0	18,1
Copeaux 25 t + lisier 25 m^3	4,4	18,2
50 t + lisier 50 m^3	5,0	19,7
100 t + lisier 100 m^3	5,2	16,8
Lisier 50 m^3	3,8	16,1

Source: Dubé (1983).

4.1.4 Compostage de surface

Le compostage de surface consiste à laisser décomposer le fumier, les pailles, les engrais verts broyés, les résidus de culture ou toute autre matière organique laissés à la surface du sol ou à les incorporer à moins de 5 centimètres de profondeur. Les résidus organiques couvrant le sol favorisent une activité biologique intense. Des produits transitoires de décomposition de la matière organique se fixent sur les particules minérales pour former des agrégats stables. Cette zone de décomposition superficielle est favorable à l'activité des vers de terre qui jouent un rôle très important dans le développement de la structure.

4.2 Rotation des cultures

Contrairement à la culture continue d'une plante annuelle (monoculture), la rotation permet la succession de diverses espèces végétales sur une même superficie.

Dans le cadre d'un programme d'amélioration de la teneur du sol en matière organique, les rotations avec les graminées et les légumineuses sont plus efficaces que celles comprenant des plantes annuelles car elles nécessitent très peu de façons culturales. Plus le nombre d'années en culture fourragère est élevé dans la rotation, plus grande est l'accumulation en matière organique dans le sol.

Les herbages concourent également à l'amélioration de la structure du sol. Les racines des graminées ont un effet bénéfique principalement en surface, tandis que les légumineuses, avec leur système radiculaire plus profond, stabilisent la structure dans les couches inférieures du profil. Les racines constituent un des outils les plus efficaces d'amélioration de l'état de la structure. Elles fragmentent les sols massifs et compacts en s'introduisant dans les fissures qu'elles agrandissent puis colmatent par l'humus qu'elles laissent en se décomposant. Les racines agglomèrent les grains sableux des sols à structure particulaire, leur conférant à la longue une structure grumeleuse. Une étude réalisée par Benoît et al. (1962) a démontré que le système radiculaire a un effet plus marqué sur la stabilité structurale que la partie aérienne (TABLEAU 32). Le tableau 33 démontre l'effet de la rotation des cultures sur la teneur en matière organique et sur la stabilité des agrégats du sol comparativement à la culture continue de maïs. Les cultures annuelles pourvues d'un système radiculaire dense favorisent elles aussi la structure à condition de limiter les façons culturales à leur minimum.

Les graminées et les légumineuses utilisées dans les rotations à bases d'herbages constituent un moyen très efficace de réduire l'érosion hydrique (TABLEAU 34). Les herbages absorbent presqu'entièrement l'énergie de battance des gouttes de pluie et éliminent le ruissellement en favorisant l'infiltration. De façon générale, la rotation diminue de 50% les pertes de sol par rapport à la monoculture (Laflen et Moldenhauer, 1971). Lorsque la rotation est à base d'herbages, la réduction des pertes de sol varie de 50 à 100% (Van Vliet et al, 1978), et de 0 à 10% si l'herbage est absent.

TABLEAU 32 -- **Stabilité des agrégats par suite de quatre traitements avec du seigle d'automne (New Jersey)**

Échantillonnage	Agrégats de 0,5 mm et plus (%)			
	Plante entière	Racine seule	Partie aérienne	Jachère
Après 2 ans	27	26	27	26
Après 3 ans	49	45	33	34
Après 4 ans	36	31	24	24
Après 6 ans	37	36	33	31

Source: Benoît et al. (1962).

TABLEAU 33 -- **Effets de la rotation des cultures sur la teneur en matière organique et la stabilité des agrégats sur une période de 10 ans pour un loam**

Culture	Matière organique dans le sol (%)	Agrégats stables* (%)
Prairie continue	4,4	85
Maïs continu	3,1	22
ROTATION DE 4 ANS		
Maïs (1re année)	4,1	52
Avoine (2e année)	4,2	56
Foin (3e année)	4,0	61
Foin (4e année)	4,4	74

Source: Anonyme (1978).

* La stabilité structurale se mesure par le pourcentage d'agrégats plus gros que 0,5 mm après tamisage dans l'eau.

TABLEAU 34 --**Efficacité d'une rotation des cultures sur les pertes de sol et le ruissellement**

Culture	Perte (%)	Ruissellement (t/ha)	Perte de sol (t/ha)
Culture continue de maïs	10	551,0	76,20
Rotation de 4 ans (maïs, avoine, luzerne)	10	129,9	10,66
Culture continue d'avoine	10	120,7	2,20
Culture continue de luzerne	10	15,5	0,04

Source: McConkey (1952).

En ce qui concerne l'érosion hydrique, le choix du type de plante dépend de l'inclinaison et de la longueur de la pente. Sur des sols ayant des pentes supérieures à 10%, seules les rotations longues incluant des pâturages et des herbages procurent une protection efficace. Sur les pentes inférieures à 10%, les rotations courtes, incluant des cultures en rangs, sont possibles moyennant certaines précautions comme la culture perpendiculaire au sens de la pente, par bandes alternées ou encore par le travail minimal et le semis direct (Mehuys, 1981).

Lorsqu'une graminée ou une légumineuse fait partie de la rotation, plante en rang suit immédiatement, et ensuite la céréale prépare le sol pour les herbages. De plus, les cultures exigeantes en azote devraient suivre les légumineuses. Il semble préférable que les rotations soient de courte durée car si une culture herbagère améliore la structure rapidement, son effet est tout aussi court lorsque la culture suivante est établie. Les rotations courtes s'adaptent à la production de récoltes commerciales, tandis que les plus longues permettent des exploitations mixtes où les récoltes servent en grande partie à l'alimentation des animaux. Finalement, il faut déterminer le type de plante à utiliser, la durée de chaque culture dans la rotation, les exigences de croissance des espèces, les possibilités d'utilisation de la culture à la ferme ou la vente à l'extérieur. Il importe de s'assurer que les champs sont libres de tout résidu d'herbicides et de posséder la machinerie nécessaire pour les semis et les récoltes (Côté, 1984).

4.3 Pratiques culturales

4.3.1 Travail minimal du sol ("minimum tillage")

Le travail minimal du sol consiste à réduire le nombre de façons culturales et à laisser les résidus de la culture précédente sur ou près de la surface du sol tout en créant un environnement favorable à la croissance des plantes. Toute la surface du champ est travaillée, mais moins intensément et moins fréquemment que dans le cas des pratiques conventionnelles. Toutes les pratiques culturales qui réduisent le retournement de la couche arable et favorisent le maintien des résidus organiques, des amendements et des fertilisants en surface font partie des pratiques de conservation.

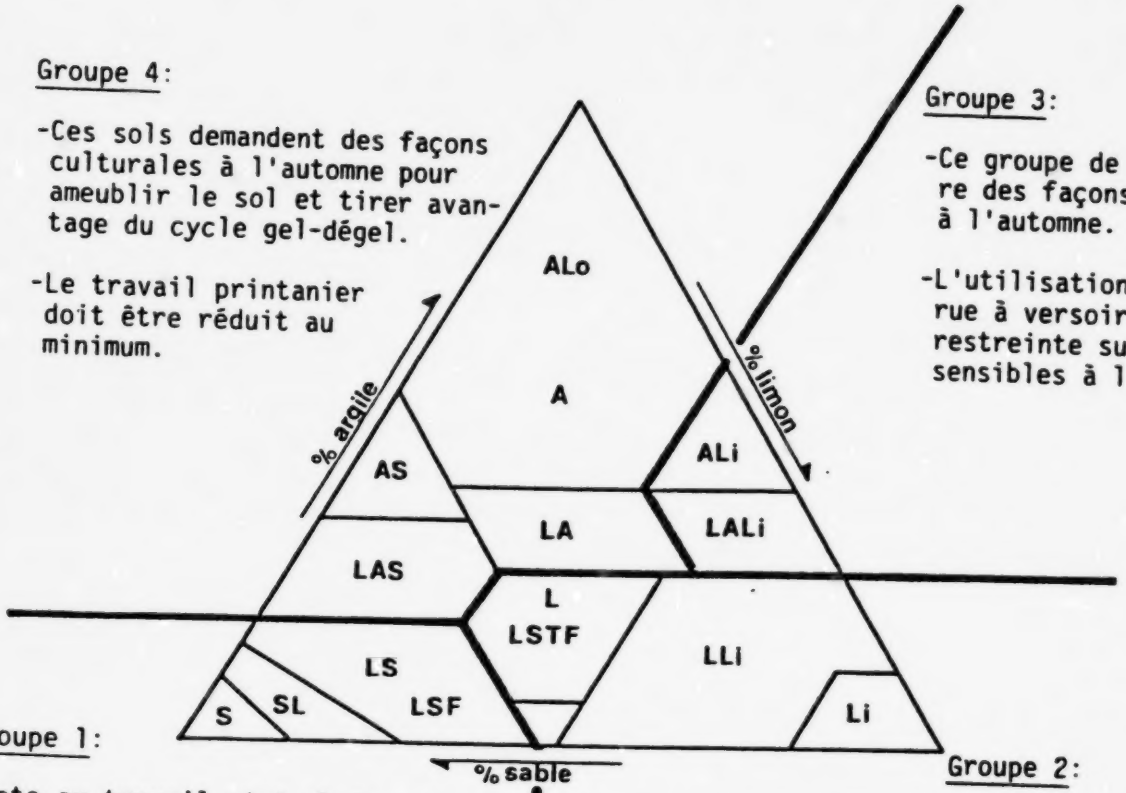
La conservation des résidus de culture sur ou près de la surface du sol offre plusieurs avantages par rapport à un sol non protégé. Les résidus réduisent non seulement l'érosion hydrique mais également l'érosion éolienne en diminuant la vitesse du vent à la surface du sol. Ils protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie, favorisent une bonne infiltration de l'eau et réduisent le ruissellement. Les pertes d'eau par évaporation diminuent, d'où un accroissement de la réserve en eau utile pour les plantes. Les diverses techniques de travail minimal permettent de réduire l'érosion hydrique des sols dans les proportions pouvant excéder 50 à 75% (Mol denhauer et al. 1971 et Wischmeier et Smith, 1978).

Le travail minimal du sol améliore le contenu en matière organique et contribue à la stabilisation de la structure (TABLEAU 35). La réduction du nombre de passages, particulièrement sous les conditions humides du printemps, diminue le compactage du sol. Finalement, en réduisant le nombre de façons culturales, le producteur passe moins de temps au champ, diminue les dépenses en carburant et en machinerie agricole et peut ainsi réduire ses coûts de production. Le seul investissement additionnel que nécessite les pratiques culturales de conservation consiste en l'achat d'un semoir spécial ou à la conversion du semoir actuel.

Cependant, dans les régions à climat frais et humide ayant une saison de végétation courte comme le Québec, le travail minimal du sol présente certains risques. Les résidus de culture ralentissent le réchauffement et le ressuyage des sols au printemps. Il peut en résulter une diminution de la capacité portante du sol, des semis plus tardifs, un taux de germination plus bas et une levée plus lente, une réduction du système radiculaire, un retard dans la croissance des plantes et une réduction des rendements. Le choix de la technique du travail minimal doit donc être établi en tenant compte de ces contraintes.

Cette technique devrait être principalement utilisée dans les terres propres, non tassées et bien drainées. Elle est bien adaptée aux tills pierreux où le labour est compliqué et où l'épierrement retarde le semis. La figure 8 indique les types de sols recommandés pour les façons culturales réduites en Ontario. Cette pratique est appelée à se répandre au Québec dans les sols argileux dégradés où l'utilisation de la charrue à corps ne fait que hâter la dégradation de la structure du sol et favoriser le développement d'une semelle de labour.

FIGURE 8 -- **Adaptation des façons culturales réduites en fonction du type du sol (Recommandation Ontario)**



Groupe 4:

-Ces sols demandent des façons culturales à l'automne pour ameublir le sol et tirer avantage du cycle gel-dégel.

-Le travail printanier doit être réduit au minimum.

Groupe 3:

-Ce groupe de sols requière des façons culturales à l'automne.

-L'utilisation de la charrue à versoir doit être restreinte sur les sols sensibles à l'érosion.

Groupe 1:

-Apte au travail minimal du sol

-Travail du sol à l'automne pas recommandé.

-Possibilité de la culture sans travail du sol.

Groupe 2:

-Travail du sol à l'automne pas recommandé.

-Le travail du sol au printemps doit être limité aux pratiques culturales minimales.

-La culture sans travail du sol est possible mais donne généralement des rendements inférieurs.

-Ces sols doivent être ameublis et/ou émiettés.

S = Sable
SL = Sable loameux
LS = Loam sableux
LSF = Loam sableux fin
L = Loam
LSTF = Loam sableux très fin
LLI = Loam limoneux
LI = Limon
LA = Loam argileux
LAS = Loam argileux sableux

AS = Argile sableuse
LALI = Loam argilo-limoneux
ALI = Argile limoneuse
A = Argile
ALO = Argile lourde

ource: Driver (1983).

TABLEAU 35 --**Diamètre moyen après tamisage des agrégats, 5e année (Loam limoneux Neubois) (Assolement de 6 ans)**

Profondeur (cm)	Diamètre des agrégats selon trois façons culturales (mm) T1	T2	T3
0 - 7	5,4 A	4,3 B	4,4 B
9 - 16	5,6 A	4,6 B	4,8 A
18 - 25	5,3	4,7	4,8 B

Source: Côté (1985).

T1 = Deux passages de vibroculteur à 10 cm de profondeur au printemps avant le semis (pratique de conservation).

T2 = Idem à T1 plus le billonnage.

T3 = Labour d'automne à 20 cm;
Vibroculteur deux fois au printemps avant le semis.

4.3.2 Culture sans travail du sol

Le semis direct est la forme extrême des pratiques culturales minimales et la plus efficace au point de vue conservation des sols. Elle ne nécessite aucune préparation de sol, autre que l'ouverture d'une étroite tranchée de largeur et profondeur suffisantes pour déposer le grain de semence. Cette technique comprend les méthodes dites de "zero- tillage", "direct planting", "direct seeding", "no plow tillage", "no till planting" et "sod planting". Les résidus de la culture précédente restent entièrement à la surface du sol tout au long de l'année, permettant une protection maximale du sol contre l'érosion éolienne, l'impact des gouttes de pluie et le ruissellement. Ils réduisent l'entraînement des sédiments, les variations de température du sol et l'évaporation de l'eau. De plus, le semis direct favorise l'élévation de la teneur en matière organique de même que la stabilité des agrégats du sol (TABLEAU 36 et 37). La figure 9 indique l'évolution de la porosité totale du sol et les tableaux 38 et 39 la masse et la distribution des racines de maïs sous des pratiques culturales de conservation. Ces pratiques réduisent aussi le temps de préparation du sol et la consommation de carburant.

Le semis sans préparation de sol s'utilise lorsque les mauvaises herbes sont réprimées, que la prévention phytosanitaire n'exige pas l'enfouissement des résidus des récoltes, que le niveau de fertilité du sol est élevé, que les sols ne sont pas tassés et qu'ils sont bien drainés. Les semis s'effectuent dans un sol recouvert d'herbages tués chimiquement ou dans les résidus de la culture précédente. Avec ce système de culture, toutes les façons culturales s'exécutent au printemps.

La culture sans travail du sol nécessite un emploi plus grand d'herbicides (Vyn et al., 1979) puisque les résidus de récolte en interceptent et en inactivent une grande partie. De plus, les désherbants appliqués en surface ont une efficacité réduite lorsque le sol superficiel demeure trop sec.

TABLEAU 36 --**Effets de deux pratiques culturales (semis direct et labour) et de quatre niveaux de fertilisation azotée sur le contenu en matière organique du sol sur le loam limoneux Maury (Kentucky) durant cinq années de monoculture de maïs**

N-apporté annuellement (kg/ha)	Profondeur du sol (cm)	Matière organique	
		Semis direct (%)	Labour (%)
0	0-5	3,68	2,37
	5-15	2,22	2,23
	15-30	1,36	1,17
84	0-5	3,96	2,60
	5-15	2,28	2,53
	15-30	1,37	1,57
168	0-5	4,11	2,78
	5-15	2,15	2,60
	15-30	1,24	1,47
336	0-5	4,53	2,79
	5-15	2,46	2,52
	15-30	1,45	1,37

Source: Blevins et al. (1977).

TABLEAU 37 --**Effets de deux années de préparation du sol sur la stabilité des agrégats du sol par suite d'un test d'impact de 200 gouttes d'eau**

Profondeur (cm)	Agrégat stable (%)	
	Labour	Semis direct
0-5	5	21
5-10	10	17
10-20	15	16

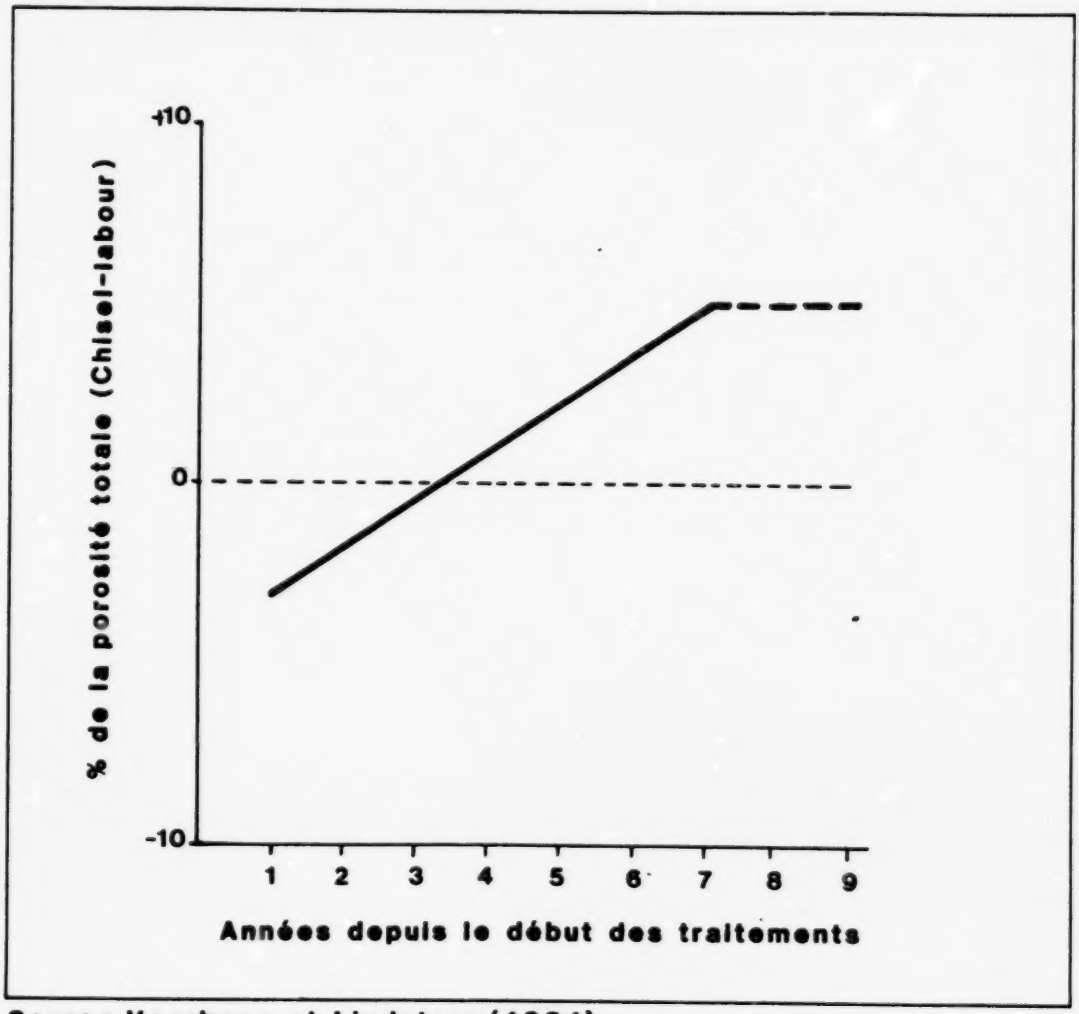
Source: Tomlinson (1974)

TABLEAU 38 --**Effets de pratiques culturales sur la masse de racines de maïs par unité de volume à diverses profondeurs**

Profondeur (cm)	Masse de racines par échantillon de volume constant (mg)		
	Labour	Chisel	Semis direct
0-7,5	250	275	625
7,5-15	325	325	250
15-22,5	170	160	160
22,5-30	75	70	75
Total	820	830	1 110

Source: Hoeft et Randall (1985).

FIGURE 9 **Évolution de la porosité totale du sol de la couche arable(0-15cm) selon que la façon culturale primaire est le labour ou le chisel sur une période de neuf ans**
(loam [illegible]mono-argileux Nicollet) (Minnesota)



Source:Voorhees et Lindstrom(1984).

TABLEAU 39 --**Effets de quatre pratiques culturales sur la longueur des racines de maïs dans la couche arable, au cours de la 5e année sur un loam limono-argileux Nicollet (Minnesota)**

Profondeur (cm)	Longueur totale de racines (cm)			
	Chisel	Charrue à corps	Semis direct	"Till-plant"
0-7,5	75	62	159	105
7,5-15	117	133	70	136
15-22	45	61	26	55
22-30	18	28	10	29
Total	255	284	265	325

Source: Bauder et al. (1985).

Comme dans le cas des herbicides, l'application des engrais est limitée, d'où des besoins de 10 à 20% plus élevés en fertilisants azotés (Stewart et al., 1985, Vyn et al., 1979). Les pertes d'azote par lessivage sont plus élevées et le taux de minéralisation de l'humus plus lent (Thomas et al., 1977). Les résidus de culture peuvent servir de support aux populations d'insectes nuisibles, aux maladies et aux organismes porteurs de ces maladies. Il est donc nécessaire dans certains cas d'accroître l'utilisation des insecticides et des fongicides. L'élimination des pratiques culturales d'automne dans les régions les plus froides ralentit le réchauffement et le ressuyage du sol et l'évaporation de l'eau au printemps entraînant un retard pour les semis, une germination et une levée plus lentes et ultérieurement une baisse de rendement lorsque les résidus de culture sont abondants.

Pour tirer tous les avantages de la culture sans travail du sol, cette pratique devrait se limiter aux sols de texture grossière comme les tills pierreux, les sols sableux, les loams et les sols argileux bien structurés qui possèdent un bon drainage. Les sols argileux mal structuré ne se prêtent pas à cette pratique à cause du risque élevé de baisse de rendement associé à des températures plus basses et au drainage plus lent de ces sols au printemps. Il en va de même pour tous les sols ayant un drainage inapproprié et une fertilité basse. Seulement 35% des sols de la plaine de Montréal seraient aptes à l'utilisation de la culture sans travail du sol (MacKenzie, 1981).

La culture sans travail du sol convient très bien aux terres vallonnées et en pente car elle permet d'y produire des cultures annuelles. Le maïs est la plante la plus cultivée selon cette méthode mais certaines autres cultures s'y prêtent comme le soja, le tabac, les plantes fourragères, les céréales et certains légumes. Une étude menée à Lennoxville (Pesant, 1979) a démontré que la culture du maïs dans le sens de la pente sans travail du sol peut constituer une méthode de lutte valable contre l'érosion et cela sans baisse de rendement. Les pertes de sol ont été réduites de 92% par rapport à un semis conventionnel (TABLEAU 40). Ceci est attribuable à la présence de chaumes et de racines de graminées entre les rangs de maïs.

Cependant, le travail minimal offre, comparativement au semis direct, plus de flexibilité pour le choix du type de sol et l'application des engrais et pesticides étant donné la quantité moindre de résidus à la surface du sol. Par contre, il est moins efficace pour le contôle de l'érosion.

TABLEAU 40 -- **Ruissellement, pertes de sol et effet sur le rendement d'une culture de maïs implantée soit en semis direct ou après labour et hersage (Lennoxville)**

ANNÉE	SEMIS DIRECT			LABOUR ET HERSAGE		
	Ruissellement (mm)	Terre érodée (kg/ha)	Rendement (m.s.) (kg/ha)	Ruissellement (mm)	Terre érodée (kg/ha)	Rendement (m.s.) (kg/ha)
1973	2,89	99	12 381	4,83	159	9 717
1974	25,33	907	3 560	72,43	17 245	9 166
1975	4,05	454	12 531	26,14	17 420	12 255
1976	23,40	1 317	11 927	47,45	15,976	11,863
Moyenne annuelle	13,91	694	10 099	37,71	12,700	10 750

Source: Pesant (1979).

4.3.3 Culture sur billon associée aux pratiques culturales de conservation

La culture sur billon est une pratique complémentaire aux façons culturales réduites et consiste à cultiver année après année des plantes annuelles sur des rangs surélevés. Le billon permet au lit de semence de se réchauffer (TABLEAU 41) et de se ressuyer plus rapidement, de concentrer entre les billons les résidus de culture associés aux pratiques culturales de conservation et d'augmenter la profondeur de sol cultivable sous les rangs dans les sols minces.

La culture de maïs fourrager en monoculture permet l'utilisation de billon non permanent refait à tous les printemps après des façons culturales superficielles sur l'ensemble du champ.

La monoculture du maïs-grain permet plutôt l'utilisation du billon permanent qui est légèrement arasé par un soc du planteur au moment du semis. Cette technique implique une préparation minimale du sol car seul la partie supérieure du billon est travaillé. Les résidus de culture conservés à la surface du sol permettent de réduire l'érosion hydrique et éolienne. La culture sur billon élimine le compactage du sol là où le système radiculaire se développe car la circulation de la machinerie se limite aux sillons (TABLEAU 42).

La confection des billons permanents ne nécessite pas d'outillage supplémentaire. L'année de l'établissement, le billon provient du buttage de la plante en rangs et sa permanence est assurée par les opérations de sarclage. Les socs du sarcleur sont orientés de façon à prendre la terre dans le fond du sillon et la projeter sur le billon, le reformant pour le prochain semis. Une fois le billon établi, l'utilisation d'un semoir spécifique est nécessaire pour préparer le lit de semence. Les opérations de récolte s'effectuent à l'aide de l'équipement conventionnel et la seule restriction est que l'espacement des roues de l'équipement de récolte coïncide avec l'espacement des billons ou des sillons.

La culture sur billon convient bien aux plantes cultivées en rangs comme le maïs, la betterave sucrière et la fève soja. La réduction de la consommation d'énergie, les semis plus hatifs et les rendements égaux ou supérieurs aux techniques conventionnelles constituent ses principaux avantages (TABLEAU 43) (Boily, 1974).

TABLEAU 41 -- **Influence du type de travail du sol sur la température du sol après le semis (Wisconsin)**

Type	Température du sol (°C)
Conventionnel	12,8
Chisel	12,8
Billon	
Entre-billon	10,0
Billon	12,8
Sans labour	10,0

Source: Buhler et Daniel (1984).

TABLEAU 42 --**Profil de densité apparente du sol de la couche arable d'un loam argileux Neubois, en monoculture de maïs fourrager depuis 6 ans. Mesure prise en août**

Profondeur	Densité apparente (t/m^3)		
	T1	T2	T3
0-5	1,04b(1)	1,09a	1,14a
5-10	1,22b	1,15c	1,31a
10-15	1,36a	1,26b	1,42a
15-20	1,44a	1,34b	1,41ab

Source: Côté (1985).

T1 = Deux passes de vibroculteur à 10 cm de profondeur au printemps avant le semis.

T2 = Idem à T1 plus le billonnage.

T3 = Labour d'automne à 20 cm;
Vibroculteur deux fois au printemps avant le semis.

1 = Test Duncan répété pour chacune des profondeurs; les valeurs suivies d'une lettre différente sont statistiquement différentes.

TABLEAU 43 -- **Rendement du maïs fourrager selon différentes pratiques culturales**

Année	Rendement maïs fourrager (t/ha)		
	T1	T2	T3
1979	11,2	11,3	10,8
1980	9,9	10,1	10,4
1981	11,2	11,5	10,5
1982	10,2	11,1	10,9
1983	7,3	8,6	7,8
1984	10,1	11,0	9,2
Moyenne	10,0	10,6	9,9

Source: Côté (1985).

T1 = Deux passages de vibroculteur à 10 cm de profondeur au printemps avant le semis.
T2 = Idem à T1 plus le billonnage.
T3 = Labour d'automne à 20 cm;
Vibroculteur deux fois au printemps avant le semis.

TABLEAU 44 -- **Influence de la profondeur du labour sur le rendement du maïs-grain en sol argileux Brookston (moyenne de 7 ans) (Ontario)**

Profondeur (cm)	Rendement (t/ha)	
	Labour d'automne	Labour de printemps
10	6,7*	6,2
20	6,5	5,7
30	6,3	5,3

Source: Bolton et al. (1977).

* p . 0.05

4.3.4 Limite de la charge et de la circulation

L'application d'une pression élevée à la surface d'un sol écrase, déforme ou fait éclater les agrégats et ce d'autant plus que le sol est humide et plastique. La diminution de la pression au sol et la réduction du nombre de passages des machines en utilisant des trains d'outils aratoires, plus spécialement en conditions humides, doivent être considérées de façon prioritaire comme moyens de préserver la structure et de minimiser le compactage. Il faut éviter d'opérer des machines lourdes, surtout celles de préparation du lit de semence et de récolte en conditions d'humidité élevée du sol. Lors des récoltes sur sol humide, il est recommandé de ne pas remplir les remorques au maximum de leur capacité pour diminuer la pression au sol. Il faut également éviter le surgonflement des pneus et adopter la pression optimale suggérée par le manufacturier en fonction de leurs caractéristiques et de la charge qu'ils doivent supporter.

L'utilisation de pneus larges, de roues jumelées et de camions montés sur larges pneus à basse pression pour épandre les amendements calcaires, les engrais minéraux et les fumiers doit être encouragée dans le but d'augmenter la surface de contact et diminuer la pression au sol.

Les pneus radiaux offrent une surface de contact accrue et plus uniforme que les pneus ordinaires, une traction supérieure et ils réduisent le glissement. Les pneus à riz utilisés pour sortir les récoltes dans des conditions humides sont néfastes s'ils sont employés le printemps à cause de la longueur des barrettes et la réduction de la surface de contact pneu-sol.

La lutte au compactage comprend également une bonne régie de la matière organique du sol et des pratiques culturales qui favorisent une structure stable dans la partie supérieure de la couche arable.

4.3.5 Profondeur des labours et préservation de la couche arable

Les labours profonds ont pour effet de remonter en surface un sol peu fertile et faible en matière organique et de diminuer les rendements (TABLEAU 44). Cette dilution prononcée de la matière organique dans toute l'épaisseur du sol labouré rend la structure du sol en surface plus sensible aux agents de dégradation. Le labour ne devrait pas excéder 15 centimètres et varier d'une fois à l'autre pour limiter la formation de semelles de labour, et détruire celles qui auraient pu se former. Les façons culturales superficielles devraient se limiter à la préparation du lit de semence.

Avant tout travail nécessitant le remaniement des couches inférieures de sol (nivelage, abaissement et aplanissage des côtes, etc.), la couche arable doit être enlevée et réétendue après les opérations.

4.4 Contrôle de l'eau du sol

4.4.1 Correctifs a apporter pour le drainage de surface

Sous nos conditions, le drainage de surface est nécessaire. Cependant, l'élimination des eaux de ruissellement ne requièrent pas toujours un modelage prononcé du terrain ou le creusage de fossés profonds lesquels entravent la circulation de la machinerie.

Depuis que les travaux mécanisés existent, les fermiers ont été laissés à leur bon jugement quant à la forme et à la nature des travaux à réaliser. Aucun suivi technique valable ne fut réalisé dans le passé pour obtenir les données nécessaires à l'établissement de recommandations ou de normes techniques de ces travaux. Encore aujourd'hui, il n'y a que très peu de travaux de recherches ou de cueillettes de données qui permettraient d'orienter les agriculteurs, alors que ceux-ci ont compris que les planches bombées ou arrondies ne sont plus un aménagement valable compte tenu des exigences de l'agriculture et des machineries modernes.

A notre avis, le drainage de surface doit être conçu dans le but d'éliminer la partie des précipitations qui ne peut pas s'infiltrer et aussi pour assainir les sols où le drainage souterrain est techniquement ou économiquement irréalisable. La conception de ces aménagements devrait se faire en fonction de la perméabilité des sols et de la topographie existante. Selon les conditions du terrain, les aménagements à préconiser sont l'aplanissement du sol et le modelage en planches tels que proposés dans le cahier de normes en drainage de surface (Asselin et al. 1986).

A notre avis, le programme d'aide sur les travaux mécanisés (SOL PLUS) doit être refondu dans le but: 1) de favoriser le drainage souterrain dans les sols profonds et perméables, 2) de subventionner uniquement des travaux d'aménagement de surface conçus et réalisés avec un souci de conservation de l'eau et du sol et 3) subventionner des travaux conçus et réalisés selon des normes techniques reconnues.

4.4.2 Correctifs à apporter aux problèmes de drainage souterrain

La conception d'un réseau de drainage efficace repose sur la connaissance des propriétés physiques et hydrodynamiques du sol. On a longtemps traité le drainage des sols agricoles selon deux catégories où les écartements étaient fixés. Par exemple, les sols plus ou moins argileux étaient drainés avec des écartements variant de 12 à 15 mètres, alors que les terres sablonneuses étaient drainées à des écartements de 18 à 20 mètres.

Déterminer l'écartement à utiliser pour drainer un sol constitue la première difficulté que doit surmonter l'ingénieur. Ce dernier doit s'appuyer sur une étude approfondie de la conductivité hydraulique du sol. L'absence de ces études entraînera la conception d'un réseau de drainage qui pourra être soit sous-dimensionné parce qu'il ne peut pas répondre aux besoins de drainage du sol, ou soit qu'il sera surdimensionné, et à ce moment trop dispendieux.

Tout projet de drainage souterrain subventionné devrait s'appuyer sur une étude approfondie des sols et de leurs besoins de drainage. Une telle étude devrait au moins identifier les caractéristiques suivantes: 1) l'origine de l'excès d'eau; 2) la conductivité hydraulique du sol, 3) la courbe granulométrique du sol, 4) la présence d'hydroxyde de fer, 5) les limites d'Atterberg. De plus, la conception et l'installation des réseaux de drainage devraient être faits selon le Cahier des normes en drainage souterrain - Agdex 555 (CPVQ, 1984).

Les sols sableux ayant une nappe d'eau élevée temporairement au printemps et à l'automne doivent faire l'objet d'une attention particulière de la part du concepteur du réseau de drainage. En effet, pour ces sols, il est recommandé de prévoir des contrôles de nappe.

Ainsi au printemps, le producteur peut laisser le système rabattre la nappe d'eau afin d'effectuer les semis. Une fois les travaux au champ terminés, il s'agit de contrôler le débit des drains afin de conserver la nappe au-dessus des drains et éviter un assèchement trop rapide du profil.

Dans les endroits où un approvisionnement en eau est disponible, le système de drainage peut être utilisé à des fins d'irrigation en renvoyant de l'eau dans les conduites. Cette technique peut être mise à profit dans les sols ayant une conductivité de l'ordre 0,5 mètre/jour et de préférence lorsque le sous-sol est peu perméable (Gallichand et al. 1983).

En ce qui concerne l'ensablement des drains ou le colmatage minéral, il se produira à plus ou moins court terme si le matériau de drainage choisi par le concepteur du projet, ne répond pas aux caractéristiques de la granulométrie du sol. A l'heure actuelle, avec les matériaux offerts sur le marché, le concepteur d'un projet de drainage en s'appuyant sur des études de sols reconnus et couramment utilisés en génie civil, peut assurer à son client un réseau de drainage qui ne s'ensablera pas dans la plupart des terres sableuses.

Les travaux réalisés au Québec par Brouillette et Delisle (1982) sur les drains filtrants, les nombreuses recherches effectuées à ce jour par le professeur Robert Broughton (1976...1986) sur les matériaux filtrants ainsi que les récentes publications de Rollin et Bolduc (1985) sur le choix des filtres en sols limoneux fins sont autant de données techniques à la portée de l'ingénieur pour le guider dans ses recommandations de matériaux de drainage convenant au sol auquel il est confronté.

Bien que le colmatage par l'hydroxyde de fer ait été étudié depuis plus de 25 ans à travers le monde, aucun moyen n'a été trouvé pour empêcher ou remédier à ce phénomène (Asselin, 1985a). Par contre, le concepteur d'un projet dispose de méthodes d'analyses simples et peu coûteuses lui permettant de diagnostiquer les sols présentant un risque de colmatage (Ford, 1982; Asselin, 1985a). C'est à lui par la suite de proposer l'établissement d'un réseau de drainage qui tiendra compte de ce risque ou tout simplement pourra recommander à son client qu'il est préférable d'utiliser un autre mode d'assainissement.

Quant au phénomène du lissage de l'argile par l'outil de pose, la détermination des limites d'Atterberg permettra de déceler les sols présentant ce risque. Dans ces types de sol, il est préférable de drainer au moyen d'une excavatrice (Naarding, 1977; Asselin, 1985d). D'ailleurs en Hollande pour le drainage des argiles sensibles, on utilise des excavatrices ou des charrues-taupes modifiées (Naarding, 1977).

De plus à mesure que les superficies drainées s'accroissent, les sols les plus faciles sont drainés. Dans le futur, nous serons amenés à drainer des sols plus difficiles, tels que les sols peu profonds et les sols peu perméables. Dans ces sols, les sytèmes de drainage classiques ne conviennent pas. Il faut donc appliquer des techniques de drainage combinant des conduites souterraines, des tranchées filtrantes, du drainage taupe en travers des files de drain ou du sous-solage. Ces méthodes sont utilisées dans les argiles lourdes et peu perméables en Angleterre (Trafford, 1970) et aussi en France dans la région de Nancy (Florentin, 1986) et de Dijon (Conceret, 1981); perrey, 1981).

L'utilisation de ces techniques exige des études approfondies pour identifier d'une part, la cause des problèmes d'assainissement et d'autre part, les différentes propriétés physiques et mécaniques des sols qui guideront l'ingénieur dans le choix d'une technique associée de drainage la plus appropriée aux conditions du site.

Enfin, la mise sur pied au niveau des régions d'un système de cueillette de données sur le rendement des réseaux de drainage serait un outil puissant nous permettant d'identifier les problèmes et d'améliorer nos techniques.

4.4.3 Correctifs à apporter aux cours d'eau

En général, les causes naturelles de détérioration des cours d'eau peuvent être en grande partie contrôlées si l'on y prête attention lors de la conception du projet d'aménagement. Selon les conditions existantes, c'est à l'ingénieur responsable du projet d'inclure des mesures de protection qui assureront une plus grande stabilité des talus et du fond des cours d'eau prolongeant ainsi leur longévité. Plusieurs techniques, tels que l'enrochement, la construction de seuils et l'engazonnement des talus, sont bien connues.

Quant aux causes humaines de détérioration des cours d'eau, elles peuvent être contrôlées par la mise en place de règlements auxquels devraient se conformer les municipalités et les riverains. A titre d'exemple, nous pouvons suggérer l'obligation de conserver une bande engazonnée le long des cours d'eau, l'aménagement adéquat des sorties de drainage souterrain et de surface et finalement, l'aménagement d'abreuvoirs pour les animaux.

4.5 Chaulage des sols

Le chaulage est actuellement la seule pratique approprié contre l'acidification des sols. Il permet de réduire l'acidité du sol, l'activité toxique de l'aluminium et du manganèse, d'augmenter la disponibilité des éléments nutritifs, l'activité microbienne du sol et les rendements. De nombreux travaux citent les effets bénéfiques du chaulage sur l'accroissement des rendement des cultures fourragères (Dionne et Pesant, 1978; Dionne 1979; Dionne 1980).

Le second rôle des amendements calcaires est de régulariser l'état ionique du complexe argilo-humique. Seuls le calcium et le magnésium assurent une floculation stable de ce complexe. Le calcium est un agent stabilisateur de la structure. Pour que les particules argileuses existent à l'état floculé, c'est-à-dire regroupées en agrégats, il faut que le sol contienne une certaine quantité de calcium, pour éviter la dispersion des colloides par les ions sodium, présents eux aussi dans le sol. Alors que la matière organique agit sur la structure des particules de sol de toutes textures, la chaux agit plus spécifiquement sur les colloides argileux pour leur conférer une stabilité structurale. Etant donné l'importance d'une bonne structure dans la partie supérieure du profil, il est préférable d'épandre les amendements calcaires à la surface ou de les incorporer par des façons culturales superficielles. Le lessivage du calcium vers la base de la couche arable se fait naturellement sous notre climat.

Il existe sur le marché trois catégories d'amendements calcaires: les produits bruts, les produits transformés et les résidus de l'industrie (TABLEAU 45). De plus, chaque amendement calcaire a son propre pouvoir neutralisant (TABLEAU 46).

Les produits bruts sont la forme d'amendement calcaire la plus économique et la plus utilisée au Québec. On en retrouve des dépôts un peu partout dans la province. Pour les produits bruts, les dépôts calcaires composés presque entièrement de carbonate de calcium sont communément appelés chaux agricole ou calco, sur le marché. Il ne contiennement que très peu de magnésium (0-1,3% Mg) comparativement aux dépôts de calcaires magnésiens (6,5-11,7% Mg) et dolomitiques (11,7-13,1% Mg).

La chaux contenant du magnésium s'applique très bien sur des sols pauvres ou sur des cultures exigeantes en cet élément. Elle se décompose plus lentement que la chaux calcaire et son effet dans le sol est prolongé.

Les produits transformés comprennent la chaux vive et hydratée. Ces amendements ne contiennent pas de magnésium. Ils sont utilisés pour des changements rapides de pH à cause de leur grande solubilité. Leur utilisation n'est réservée qu'à de petites superficies étant donné leur coût, leur effet à court terme et la grande difficulté de les épandre.

Les produits industriels sont très peu utilisés car ils nécessitent une manutention difficile et peuvent contenir des impuretés toxiques. Ces amendements proviennent d'industries qui utilisent de la pierre à chaux ou du phosphate de roche dans leurs procédés industriels.

Lors de l'application de pierre à chaux, il demeure important de ne pas dépasser le dosage recommandé pour éviter le surchaulage du sol. Le cas échéant, il peut se produire un déséquilibre parmi les micro-organismes du sol et une diminution de la solubilité des oligo-éléments résultant en une baisse de rendement.

TABLEAU 45 -- **Produits neutralisant l'acidité**

Produits transformés		
Chaux vive	CaO	80%-85% CaO
Chaux hydratée	$Ca(OH)_2$	50%-72% CaO
Produits bruts		
Chaux calcitique	$CaCO_3$	0%-1.3% Mg
Calcaire magnésien		6,5%-11.7% Mg
Chaux dolomitique	$CaCO_3$	11,7%-13,1% Mg
Marne		
Autres		
Résidus d'industries		
- Raffinerie de sucre		
- Hauts fourneaux		
- Fabrication de gaz		
- Déchet d'amiante		
Cendre de bois		
Coquillages		

Source: Dubé et Gaudette (1980).

TABLEAU 46 -- **Pouvoir neutralisant de différents matériaux de chaulage e leur équivalent $CaCO_3$**

Matériel	Équivalent carbonate de calcium	Équivalent à 1 tonne de $CaCO_3$ (kg)
Carbonate de calcium $CaCO_3$	100	1 000
Carbonate de magnésium $MgCO_3$	119	840
Dolomie $MgCa(CO_3)_2$	95-108	925-1 050
Hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$	135	740
Hydroxyde de magnésium $Mg(OH)_2$	172	580
Oxyde de calcium CaO	178	560
Oxyde de magnésium MgO	250	400
Pierre à chaux moulue	variable	variable

Source: Adapté de Dubé et Gaudette (1980).

4.6 Pratiques anti-érosives

4.6.1 Pratiques culturales

4.6.1.1 Cultures de couverture

Par définition, on désigne ainsi toute culture servant de couverture végétale pour protéger le sol, qu'elle soit semée ou non à cet effet. Plus spécifiquement, ce terme s'applique aux cultures implantées pour protéger le sol contre l'érosion hydrique et éolienne.

Les cultures de couverture se pratiquent dans les régions où, par suite de la clémence de l'hiver, les terres agricoles ne sont pas protégées et sont soumises à l'érosion provoquée par les pluies hivernales ainsi que par celles de l'automne et du printemps lors du dégel. Ces cultures servent à protéger les champs après la récolte de la culture principale et avant l'ensemencement de la suivante.

La protection apportée par une culture de couverture demeure une mesure intermédiaire entre le sol fraîchement labouré et celui couvert d'un herbage dense. En plus de son rôle de protection, elle sert d'engrais vert.

La culture de couverture est généralement une légumineuse ou une céréale à petits grains semée l'automne. Lors de récolte tardive ou de mauvaises conditions climatiques, il est préférable de compter sur la protection fournie par les résidus de la culture et de ne labourer qu'au printemps. On utilise soit le ray-grass, le sarrasin, l'avoine, le blé, l'orge ou de préférence le seigle. L'avoine et l'orge agissent comme semis d'urgence au printemps et sont donc moins efficaces que le seigle. Si la croissance durant la période automnale a été suffisante, la culture de couverture offre une bonne paissance. Pour l'érosion éolienne en sols organiques, la céréale peut être labourée en laissant à tous les 80 mètres, des bandes de 2 mètres de largeur servant de barrière contre le vent (Côté, 1984).

4.6.1.2 Culture en contrepente

Cette technique consiste à disposer les cultures perpendiculairement à la pente dominante. Elle permet l'établissement de la plupart des cultures annuelles sur des pentes allant jusqu'à 10%.

Les sillons laissés par les instruments aratoires et les rangs des plantes servent de barrages à l'écoulement de l'eau réduisant ainsi le ruissellement et les pertes de sol. Sur des pentes supérieures à 10%, cette technique ne doit pas être utilisée car le bris des billons augmenterait le danger de ravinement.

La culture en contre-pente peut diminuer les pertes de sol de 25% (Moore et al., 1979). Finalement, les sols en pente doivent être labourés

le printemps afin de laisser les résidus de culture à la surface le plus longtemps possible.

4.6.1.3 Culture en bandes alternées

Cette pratique consiste à faire des bandes engazonnées avec des bandes de cultures annuelles. Les bandes sont longues et étroites, orientées perpendiculairement à la direction des vents dominants dans le cas de l'érosion éolienne ou à la pente contre l'érosion hydrique.

Dans le cas de l'érosion éolienne, les bandes engazonnées réduisent la vitesse du vent, retiennent les particules de sol en saltation et permettent ainsi de freiner le processus d'avalanche. Par conséquent, plus les bandes sont étroites, plus leur action anti-érosive est efficace. Selon Chepil et Woodruff (1963), la largeur des bandes devraient varier selon la texture du sol. Elle augmente à mesure que la texture du sol s'affine sauf pour les argiles sujettes à granulation car celles-ci se comportent alors à peu près comme des particules de sable (TABLEAU 47). Cependant, la largeur des bandes peut varier pour faciliter le passage de la machinerie. Au Québec, cette technique correspond à une rotation courte et est utilisée pour la rotation tabac-seigle.

TABLEAU 47 -- **Largeur des bandes recommandées en fonction de la texture du sol**

TEXTURE	LARGEUR DE LA BANDE (m)
Sables	6
Sables loameux	8
Loams sableux	30
Loams	75
Loams limoneux	85
Loams argileux	105
Loams argilo-limoneux	130
Argiles sujettes à granulation	25

Source: Chepil et Woodruff (1963).

En ce qui concerne l'érosion hydrique, la largeur des bandes est égale à un multiple de celle des instruments aratoires, et varie de 15 à 40 mètres selon les conditions de sol, de topographie et le type des cultures. Deux bandes successives ne doivent pas porter la même culture ou être travaillées ou récoltées en même temps. Là où le risque d'érosion est élevé, les bandes en herbages peuvent être plus larges que les bandes en cultures annuelles.

Les variantes principales de cette technique sont la culture en bandes suivant les courbes de niveau, la culture en bandes parallèles possible sur les pentes régulières et la culture en bande avec tampons enherbés. Ces différentes modifications ont été faites pour s'adapter aux conditions des champs. Leur efficacité à réduire les pertes de sol varie comme le démontre le tableau 48.

Pour ce type de culture, la pente ne devrait pas excéder 10% pour les sols mal drainés et très sensibles à l'érosion, 15% pour les sols moyens et 20% pour les sols bien drainés résistant à l'érosion. Les cultures sarclées devraient être éliminées sur des pentes supérieures à 10%.

La culture en bandes s'utilise principalement pour la rotation maïs-céréale-foin-foin. Ce type de rotation permet de réduire l'érosion de 50 à 75% lorsque la culture est pratiquée en travers de la pente et même davantage si elle suit les courbes de niveau. En plus de limiter l'érosion, les rendements sont supérieurs. Cependant, cette technique ne s'emploie que très peu au Québec pour le contrôle de l'érosion hydrique car les terres dans les régions accidentées ont été cadastrées en bandes étroites perpendiculaires aux cours d'eau, forçant les producteurs à cultiver dans le sens de la pente.

TABLEAU 48 -- **Influence du sens des labours sur la perte de sol**

Sens des labours	Réduction de la perte de sol* (%)
Culture en travers de la pente	25
Culture selon les courbes de niveau	50
Culture en bandes en travers de la pente	60
Culture en bandes selon les courbes de niveau	70

Source: Moore et al. (1979).

* Valeurs obtenues à l'aide de l'équation universelle de perte de sol.

4.6.2 Ouvrages de génie

4.6.2.1 Voies d'eau engazonnées

Les voies d'eau engazonnées servent de moyen de prévention contre l'érosion par rigole et par ravinement. Ce sont des voies d'eau naturelles ou artificielles, de pente douce, larges, peu profondes et semées de plantes fourragères courtes résistantes à l'érosion. Les pentes des talus sont suffisamment faibles pour permettre le passage des machines agricoles. De fa-

çon générale, elles servent à acheminer le surplus d'eau après les pluies abondantes et la fonte des neiges. Le reste du temps, elles demeurent sèches. Elles s'utilisent conjointement avec les rotations, les cultures en bandes et les terrasses.

Pour le Québec, les plantes recommandées sont les graminées semées avec plantes-abri (TABLEAU 49). La fétuque élevée et l'alpiste roseau se prêtent bien aux terrains humides; le brome s'adapte bien aux sols fertiles et profonds et le pâturin des prés aux sols dont le contenu en matière organique est élevé.

TABLEAU 49 -- **Espèces recommandées au Québec et taux de semis pour la protection des voies d'eau**

ESPÈCE	DOSE DE SEMIS(1) (kg/ha)	(g/100m^2)	REMARQUE
Alpiste roseau	6-10	60 -100	Très résistante
Fétuque élevée	7-10		
Fétuque rouge	11-13	110-130	Ne nécessite pas de fauche
Pâturin des prés	7-9	70-90	
Agrostide	7-10	70-90	
Fléole	10-12	100-120	
Mélanges de graminées	6-10	60-100	
Plantes annuelles(2)			
- avoine	95	950	Comme protection temporaire
- blé	135	1350	
- seigle	125	1250	

Source: Lagacé (1980b).

Notes: (1) Semis à la volée: doubler la dose
(2) Comme plante abri, utiliser les 3/4 de la dose

Les voies d'eau doivent être ensemencées le printemps car l'humidité plus élevée du sol permet une meilleure germination donc un établissement plus rapide pour affronter les pluies d'automne. Passé le début août, la période de croissance est trop courte pour former un bon couvert végétal. Le paillis est recommandé lors de l'établissement parce qu'il offre une protection temporaire et conserve l'humidité nécessaire à la germination.

Les voies d'eau doivent être chaulées et fertilisées pour le maintien d'un bon couvert végétatif. De plus, les plantes peuvent être récoltées comme foin si la croissance a été suffisante.

Les voies d'eau n'ont aucun effet direct sur les rendements sauf en ce qui concerne la baisse associée à la diminution de la superficie cultivable. Finalement la végétation élimine pratiquement toute érosion dans la voie d'eau et retient une partie des sédiments apportés par le ruissellement.

4.6.2.2 Terrasses

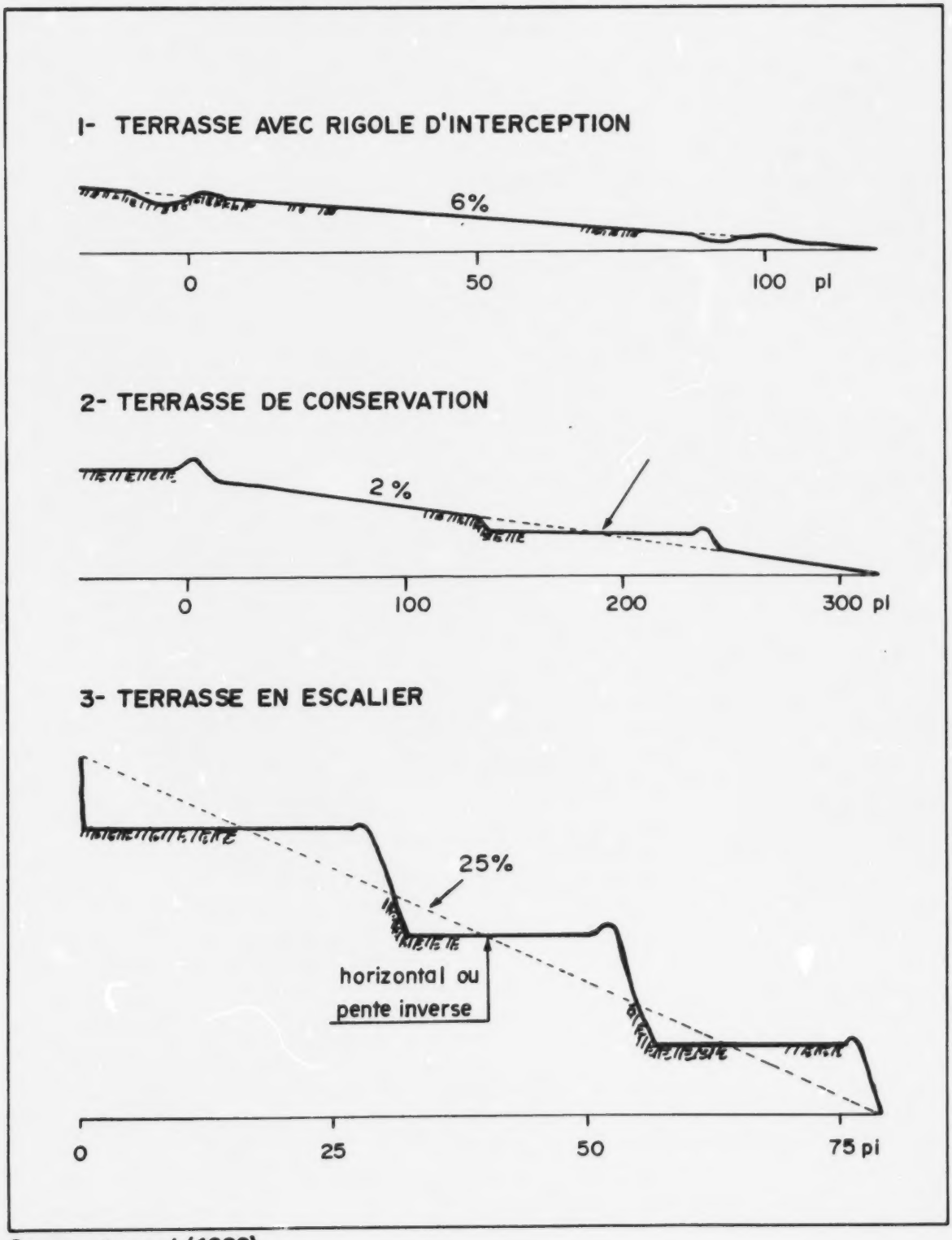
La terrasse est formée d'un fossé de canalisation combiné à un remblai de sol aménagé en travers de la pente. Son but est de réduire la longueur de la pente du champ; elle intercepte et conduit les eaux de ruissellement de surface à des vitesses non érosives vers une sortie d'évacuation stable ou une voie d'eau engazonnée. C'est l'une des pratiques culturales les plus efficaces sur longue pente cultivée sous régime intensif de production. Cependant, l'aménagement d'une terrasse requiert les services d'un ingénieur pour le calcul des pentes, de l'espacement, de la longueur des terrasses etc. Elle est coûteuse à construire et demande un entretien.

La largeur des terrasses est fonction de la pente, du type de sol, de l'intensité et de la quantité des pluies, de la vulnérabilité du sol à l'érosion, des pratiques culturales, du type de culture et des mesures de conservation additionnelles. L'espacement réel des terrasses tient compte de la largeur de la machinerie utilisée, de l'espace occupé par la terrasse de canalisation et d'un facteur de glissement et d'ajustement. Cependant, l'espacement minimal recommandé ne sera jamais inférieur à 40 mètres pour des raisons économiques. La longueur maximale des terrasses varie de 300 à 550 mètres. La pente du canal intercepteur est généralement de 0,4%, mais peut varier de 0,1% à 2%. La vitesse d'écoulement dans le canal ne doit pas excéder celle qui provoquerait l'érosion. En général, les fossés sont cultivés et la pente des talus suffisamment faible pour permettre la circulation des machines. La pente maximale se situe alors à 1:4. Les fossés intercepteurs se déversent dans les voies d'eau enherbées ou protégées par de la pierre. Ces fossés interceptent les sédiments provenant de la pente et accroissent ainsi l'efficacité des terrasses (Côté, 1984).

Il existe trois types principaux de terrasses: en escalier, de conservation et avec rigole d'interception dont l'usage est conditionné principalement par la topographie locale (FIGURE 10). Sous nos conditions, seulement les deux derniers types de terrasses peuvent s'utiliser.

Les terrasses avec rigole d'interception sont celles qui conviennent le mieux à nos conditions. Elles captent l'eau et l'évacuent lentement de façon à limiter les risques d'érosion. Elles sont constituées d'un billon assez large et d'une voie d'eau plus profonde aménagée derrière. Ce canal de drainage est large, de pente faible avec des talus en pente douce et possède une grande capacité d'écoulement. Ce type de terrasse s'utilise sur des pentes de 12 à 15% et même davantage.

FIGURE 10 **Les types de terrasses**



Source: Lagacé (1980).

L'efficacité des terrasses pour réduire l'érosion peut atteindre 85%. Cette efficacité est fonction de la culture, du climat, des caractéristiques du terrain, du type et de l'état des terrasses. Dans certains cas, il est nécessaire d'utiliser des mesures agronomiques complémentaires pour augmenter l'efficacité des terrasses. On peut utiliser comme technique additionnelle la culture par bandes alternées, sur billon, ou suivant les courbes de niveau, l'utilisation de plantes-abri, la rotation et l'enfouissement d'engrais vert pour augmenter la teneur en matière organique du sol et les pratiques culturales de conservation. Leur application est cependant restreinte en raison des limitations imposées par la division cadastrale.

4.6.2.3 Brise-vent

Le brise-vent sert principalement à atténuer la vitesse du vent au niveau du sol. Il améliore également le micro-climat des champs et favorise la conservation de l'eau utile du sol. Son efficacité est influencée par la vitesse et l'angle d'attaque du vent, la configuration, l'épaisseur,la hauteur et la porosité totale du brise-vent. Il existe deux types de brise-vent: (1) les brise-vent inertes qui regroupent les clôtures à neige et de bois, les murets et palissades, les rangées de sacs, de balles de paille et de levées de terre et, (2) les brise-vent vivants constitués d'arbres et d'arbustes.

Les brise-vent inertes (de 60 à 150 centimètres de hauteur) exigent beaucoup de main-d'oeuvre lors de leur installation. D'une efficacité limitée de 12 à 15 fois leur hauteur, ils sont utilisés comme protection temporaire sur des lieux particulièrement menacés tels les points d'abreuvement, les cultures vulnérables et pour les sols facilement érodables.

L'ancrage des brins de paille dans le sol est une technique principalement utilisée sur les sols organiques d'Europe mais pourrait facilement s'adapter aux sols québécois. Cette méthode consiste à fixer au sol une rangée de paille à tous les six rangs de légumes. Elle offre les avantages suivants:

1 - La conservation de l'eau et des nutriments par suite de la nature inerte de la paille.

2 - La protection rapide pour les semis hâtifs.

3 - Un micro-climat favorisant une protection accrue.

4 - Une faible quantité de paille nécessaire à protéger une superficie relativement grande car seulement 1 hectare de céréales suffit à approvisionner en paille 5 hectares de cultures sarclées.

Contrairement aux brise-vent inertes, les arbres et arbustes fournissent une protection de longue durée. Cooke et Doornkamp (1974) ont noté une diminution de la vitesse du vent de 20% à 20 H, mais de 0% de 30 à 40 H pour un vent perpendiculaire au brise-vent (H étant la hauteur du brise-vent). Cette distance de 20 H est minimale pour éviter la turbulence du vent à l'intérieur du système et optimale pour son efficacité (Sturrock, 1975). La longueur du brise-vent doit être au moins égale à 12 H pour éviter une turbulence latérale excessive du vent. Le brise-vent doit être assez poreux car une faible perméabilité provoque beaucoup de turbulence, réduisant ainsi la zone d'efficacité. Un brise-vent imperméable augmente les risques de maladie par suite de la stagnation de l'air. En réduisant le mouvement de l'air, il augmente ainsi les dangers de gel sur sol sec (Robertson, 1978).

Les barrières d'arbres occupent entre 1 et 5% de la surface cultivée (Sturrock, 1975). Dans le cas de cultures de grande valeur et très sensibles à l'érosion éolienne, ce pourcentage peut s'élever jusqu'à 10%. Généralement, la perte d'espace est largement compensée par le micro-climat favorable qui en résulte. Les barrières permettent de réduire l'évapotranspiration, d'activer la photosynthèse, d'augmenter la qualité des produits, l'humidité de l'air et la température du sol, d'améliorer dans une certaine mesure les propriétés physiques et chimiques du sol et de favoriser une augmentation des rendements. Les rendements en herbages peuvent s'accroître de 6 à 14%; de 7 à 47% pour les céréales, de 11 à 71% pour les fruits et de 0 à 80% pour les légumes. Les barrières d'arbres sont généralement ignorées par les agriculteurs car elles demandent quelques années avant d'être efficaces, interfèrent avec la machine agricole et nuisent lors des arrosages aériens et terrestres de pesticides. Les arbres peuvent également être sensibles à certains herbicides utilisés en production agricole. Ils peuvent être porteurs d'agents pathogènes ou encore attaqués par des insectes ou par des maladies d'où la necessité de replanter ou d'utiliser des mesures additionnelles. De plus, les arbres du rideau protecteur font concurrence aux plantes cultivées pour la lumière, l'eau et les éléments nutritifs. Par contre, cette zone de moindre rendement près du brise-vent est largement compensée par une augmentation dans la zone protégée (Sturrock, 1975).

Les recommandations sur la disposition des arbres et arbustes lors de l'aménagement varient selon les auteurs. Woodruff et al., (1977), recommandent de planter aux limites de la ferme deux rangées d'arbres, dont l'une est composée d'arbustes conifères et l'autre d'arbres décidus à croissance rapide. A l'intérieur de ces limites, des rangées d'arbres sont plantées à tous les 120 mètres sur les sols sensibles à l'érosion et à tous les 150 à 200 mètres sur ceux modérément sensibles. Si la protection n'est pas suffisante, des bandes additionnelles peuvent être ajoutées.

Le ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec (1972) recommande la plantation de résineux. Deux à cinq rangées alternées d'arbres perpendiculairement au vent dominant constituent un brise-vent efficace si les espacements suivants sont respectés: de 2 à 3 mètres entre les arbres et les rangées d'arbres; de 0,6 à 1,5 mètres entre les cèdres et les rangées d'arbustes, de 0,45 à 0,6 mètre entre les arbustes et de 0,4 à 1,2 mètre entre les arbres disposés en haie.

4.7 Problèmes particuliers aux sols organiques

4.7.1 Contrôle de la nappe phréatique

Le maintien d'une nappe d'eau élevée diminue la quantité d'oxygène qui diffuse dans le sol et permet de réduire l'activité microbienne. Ainsi, la production de CO_2 dans un champ où la nappe d'eau est maintenue soit à 60 centimètres, soit à 90 centimètres, est de 9 à 14 fois plus élevée que dans un champ où la nappe d'eau est maintenue à 30 centimètres (Jasmin et al., 1977). Par contre, le système radiculaire des plantes requiert une bonne aération du sol. Donc une régie rationnelle doit fournir assez d'air pour la croissance des plantes sans trop stimuler l'activité microbienne. De plus, le niveau de la nappe d'eau doit être ajusté pour tenir compte de la capacité portante du sol en fonction de la machinerie utilisée en production maraîchère.

L'élévation de la nappe phréatique contrecarre aussi le tassement du sol par gonflement des fibres, et la compression du sol par l'application d'une pression ascendante sur les couches supérieures de sol.

Le contrôle de la nappe phréatique permet également de réduire l'érosion éolienne en augmentant la force d'adhésion entre les particules de sol par le maintien de la surface à l'état humide. Le contrôle de la nappe d'eau s'effectue soit à l'aide de barrages, de drains souterrains et de systèmes de pompage si le sol démontre une profondeur et une perméabilité suffisantes.Le contrôle de la nappe d'eau est réalisable seulement si les réserves d'eau sont suffisantes pour regénérer la nappe et si cette eau voyage rapidement dans le sol.

Cependant, il est difficile de maintenir une nappe d'eau à 1 mètre dans deux champs voisins, si les sols ont des profondeurs et des propriétés physiques très différentes. Ainsi, les sols moins profonds que 80 centimètres se prêtent difficilement au contrôle de la nappe d'eau.

4.7.2 Irrigation de surface

L'irrigation de surface utilisée conjointement avec le contrôle de la nappe phréatique est probablement la méthode de lutte à l'érosion éolienne la plus efficace en sol organique. Elle permet de garder constamment humide les quelques centimètres de sol en surface qui ont tendance à se dessécher sous l'action du vent. De plus, le fractionnement des applications d'eau, permet de diminuer le degré d'érosion de 10 à 20 fois (Bodolay, 1974). Pour un meilleur contrôle, l'irrigation doit débuter avant que le vent se lève et que la surface du sol soit sèche.

4.7.3 Inhibiteurs de l'activité enzymatique

L'oxydation de la matière organique peut être ralentie par l'addition d'inhibiteurs comme le cuivre et le zinc. A la dose recommandée, ces éléments freinent la décomposition des matières organiques sans nuire à la

bonne croissance des plantes. Le cuivre et le zinc inhibent les enzymes qui catalysent l'oxydation des matières organiques. En effet, la baisse de l'activité enzymatique en sol organique est souvent liée à la concentration du sol en cuivre et en zinc. Cependant, la contribution réelle de cette inhibition au ralentissement du taux d'affaissement n'est pas encore bien quantifiée. L'addition de cuivre aux sols organiques permettrait donc non seulement de corriger une carence généralement reconnue dans ces sols, mais également de réduire le taux d'oxydation. Cette mesure pourrait être plus efficace en sol cultivé depuis peu et encore mésique ou faiblement humique, puisqu'une surface bien humifiée devient très pulvérulente et, par conséquent, très sensible à l'érosion éolienne.

4.7.4 Apport de sol minéral

Cette pratique peu connue au Québec est couramment utilisée en Europe. L'apport de sable grossier en surface semble donner les meilleurs résultats puisque la surface du sol est protégée de l'érosion éolienne et permet également d'améliorer l'approvisionnement en eau de la surface et les propriétés mécaniques du sol. L'apport d'argile est moins intéressant en culture maraîchère puisque l'argile adhère aux légumes et diminue la qualité du produit. Cependant, la nature du sous-sol minéral des sols organiques minces du Québec ne permet généralement pas d'obtenir le sable grossier désirable, comme c'est le cas en Europe centrale.

4.7.5 Régie des pratiques culturales

L'intensification des façons culturales tend à faire augmenter le contenu des sols en oxygène, à fractionner les fibres en fines particules et à accentuer le tassement des sols. Le labour est maintenant moins fréquent qu'autrefois et la bêche rotative est utilisée avec plus de parcimonie. Toutefois, le nombre de hersages devrait être limité au minimum pour réduire le fractionnement des fibres. De plus, à cause des différences considérables de propriétés physiques entre les sols nouvellement drainés et les sols exploités depuis longtemps, la régie des sols organiques nécessite des pratiques culturales différentes suivant la longueur de la période d'exploitation.

4.8 Contamination des sols

4.8.1 Régie de l'épendage des boues

Même si l'application des boues n'est pas encore une pratique courante au Québec, certaines caractéristiques des sols devront être prises en considération avant de procéder à l'épandage des boues si l'on veut prévenir leur contamination et s'assurer de la qualité des récoltes tout en protégeant l'environnement.

L'épandage devrait se faire sur des sols présentant des pH variant entre 6,5 et 7,0 afin de réduire la mobilité et donc la disponibilité de la plupart des éléments non désirables pour la plante.

Les sols de texture limoneuse à argileuse qui ne présentent pas de problème de perméabilité et qui jouissent d'une capacité d'échange ionique élevée sont les plus appropriés pour l'application de boues résiduaires. Les graviers et les sables, à cause de leur perméabilité excessive, ne devraient pas être utilisés pour ces applications afin de ne pas risquer de contaminer la nappe phréatique. Les sols argileux qui présentent une mauvaise structure et qui ne sont que peu perméables, présentent des risques de ruissellement et devraient être évités lorsque c'est possible. Les sols organiques ainsi que ceux sensibles au ravinement ne devraient jamais être utilisés à cette fin.

La pente est également un facteur important à considérer. Tout sol présentant une pente supérieure à 9% ne devrait pas être utilisé afin d'éliminer tout risque de contamination par l'eau de ruissellement.

L'épaisseur du sol au-dessus des assises rocheuses et la hauteur de la nappe phréatique constituent aussi des paramètres qui doivent être considérés avant de procéder à l'épandage de boue. En effet, aucune boue ne devrait être appliquée sur un sol dont l'épaisseur est inférieure à 1,5 mètre. Il en est de même pour les sols dont la nappe phréatique se situe à moins de 1 mètre de la surface.

Les sols saturés d'eau, gelés ou enneigés ne peuvent être utilisés pour l'épandage des boues. Il en est de même pour ceux dont la teneur en phosphore assimilable, telle que déterminée par la méthode de Bray[2], dépasse 400 kilogrammes/hectare ou encore qui présentent des teneurs en métaux lourds supérieures aux limites permises.

Plusieurs cultures (gazon, sylviculture ...) se prêtent particulièrement bien à l'épandage des boues. Les sols utilisés pour la production de maïs-grain et de céréales (blé, orge, avoine) peuvent également recevoir des applications de boues, étant donné que les métaux lourds s'accumulent moins dans les grains que dans les feuilles et que ce sont ces parties de plantes qui sont consommées. Dans le cas de ces dernières cultures les boues devraient être épandues avant le semis ou après la récolte. Aucune application ne devrait être effectuée sur les sols où sont pratiquées des cultures fruitières ou légumières. Dans l'éventualité où des boues auraient été ap-

pliquées, un délai de trois ans est exigé avant que le producteur puisse procéder à de nouvelles cultures légumières ou fruitières.

Dans le cas des plantes fourragères (prairies et pâturages), l'épandage des boues peut se faire avant l'émergence de la végétation ou encore après les coupes ou les paissances mais avant les repousses (Saint-Yves, 1984). L'application de boues d'égout sur les pâturages nécessite des délais avant la paissance, variant de deux mois pour les chevaux et les bovins de boucherie, à six mois pour les moutons et les porcs et jusqu'à 2 ans pour les bovins laitiers.

Finalement, il existe deux façons acceptables d'épandre les boues sur les terres agricoles. Dans le cas des boues liquides, il s'agit de l'injection sous la surface du sol et dans le cas des boues solides, de l'épandage en surface suivi d'une incorporation au sol dès que possible. L'injection au sol est préférable car elle diminue les pertes d'azote par volatilisation, les risques de contamination par ruissellement et supprime les odeurs, la vermine et les difficultés d'acceptation par le voisinage. Les boues ne doivent pas être épandues lors de pluie, lorsque le sol est couvert de neige, de glace, gelé ou saturé d'eau afin d'éviter toute possiblité de contamination par ruissellement.

L'épandage des boues avec un équipement non approprié et dans des conditions non propices, peut endommager la structure et favoriser le compactage des sols.

4.8.2 Utilisation rationnelle des pesticides

La lutte intégrée contre les ennemis des cultures est sans contredit une alternative à considérer pour la rationalisation de l'utilisation des pesticides afin de préserver la qualité de l'environnement et la santé humaine. Cette technique se décrit comme étant la combinaison de différentes méthodes de régie des populations de ravageurs visant à les maintenir sous un niveau de dommages économiques (Sauriol et Brodeur, 1985). L'objectif recherché vise l'optimalisation de l'application des traitements antiparasitaires dans le but d'en réduire leur nombre tout en permettant un contrôle efficace des ravageurs, mais pas l'éradication absolue. Les réseaux de dépistage de lutte intégrée préconisent actuellement l'utilisation de produits chimiques ou la lutte culturale en modifiant les dates de semis et de récolte et en utilisant des cultivars moins sensibles aux insectes et maladies.

Toutefois, l'utilisation de la lutte biologique dans les réseaux de lutte intégrée pourrait encore réduire le nombre de traitements chimiques. Elle recourt à l'utilisation d'organismes vivants (bactéries, champignons, insectes et nématodes) pour maintenir sous un seuil économique les différentes populations de ravageurs. Comparativement à la lutte intégrée, la lutte biologique vise une approche globale de l'agro-écosystème. Cependant, cette approche demeure plus complexe mais assure une plus grande stabilité de l'agro-écosystème lorsque l'équilibre est atteint.

CHAPITRE 5

Conclusion

5.1 Conclusion

La dégradation des sols au Québec existe mais aucun inventaire complet ne permet d'évaluer avec précision l'ampleur du problème. Cette dégradation remonte aux années soixante et marque le début du délaissement des productions animales aux profits des productions végétales spécialisées et simultanément l'abandon des rotations longues à base de plantes fourragères. La situation actuelle résulte d'un manque de connaissances et de sensibilisation de la part de tous les intervenants du milieu agricole et est d'autant plus importante car nos ressources en sol à bon potentiel agricole sont limitées.

L'application des pratiques culturales connues à ce jour et ne nécessitant aucun investissement supplémentaire peut en grande partie remédier aux problèmes de la dégradation des sols. De plus, une expérimentation plus poussée des techniques de conservation des sols et la vulgarisation de celles-ci doivent être entreprises afin de compléter l'arsenal mis à la disposition de l'agriculteur et contrôler ainsi la dégradation des sols au Québec.

Quoi qu'il en soit, les sols doivent être sauvegardés peu importe le prix car ils sont considérés comme une ressource non renouvelable.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

Agriculture Canada, 1973. L'érosion éolienne: Causes, dégats, remèdes. Publication 1266, Agriculture Canada, 34p.

Agriculture Canada, 1985. Les terres agricoles et les ressources hydraulique au Canada: Situation et perspectives. Cat. No. A22-108/1985. Approvisionnements et Services Canada, Ottawa.

Alison, F.E. 1973. Soil organic matter and its role in crop production Elsevier Scientific Publishing Co., New York.

Andrews, W.B. 1954. The response of crops and soils to fertilizers and manures. 2nd ed. cité par Tisdale, S.L. and W.L. Nelson, 1975. Soil fertility and Fertilizers pp. 177-179 MacMillan, N.Y.

Anonyme, 1978. Ontario Soils. Ontario Ministry of Agriculture and Food. Publication #492.

Armbrust, D.V. 1977. A review of mulches to control wind erosion. Trans. Am. Soc. Agr. Eng. 20 (5): 904-905.

Arsenault, J.L., Kolstee, H., Himelman, D. et Daigle, J.L., 1982. L'érosion du sol. Publication no. 9, par le Comité des provinces de l'Atlantique sur le Génie Agricole, 11 p.

Asselin, R. 1977. Projet d'une nouvelle formule d'intervention pour les travaux d'amélioration foncière, Bureau régional 04, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Nicolet.

Asselin, R. 1980. Le drainage de surface et le nivellement du sol. Dans: Egouttement superficiel, 8 colloques de Génie Rural - Publication Gr.-H-80-01. Université Laval, p. 53-71.

Asselin, R. 1985a. Le colmatage des réseaux de drainage souterrain par l'hydroxyde de fer. Une revue de littérature. Dans: La recherche en drainage souterrain, 12e Colloque de Génie Rural, Université Laval, GR-H-85-01, pp. 161-194.

Asselin, R. 1985b. Observation sur le colmatage ferrique des réseaux de drainage et prévision du phénomène. Dans: La recherche en drainage souterrain, 12e Colloque de Génie Rural, Université Laval, Gr-H-85-01, pp. 213-252.

Asselin, R. 1985c. Evaluation du rendement du système de drainage existant. Rapport d'études ferme Jean-Claude Verville, Partie I. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Région 04, Nicolet.

Asselin R. 1985d. Comparaison de deux installations expérimentales. Partie II, Rapport d'études ferme Jean-Claude Verville. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Région 04, Nicolet.

Asselin, R., Boudreau, A., Brouillette, M. et C. Nolet, 1986. Cahier de normes pour le drainage de surface. Atelier hydraulique agricole du Conseil des productions végétales du Québec (en préparation).

Baligar, V.C., Nash, V.E., Hare, M.L. et Price, J.A. 1975. Soybean root anatomy as influenced by soil bulk density. Agron. J. 67, 842-844.

Barnes, K.K., Carleton, W.N., Taylor, H.M. et R.I. Throkmorton, 1971. Compaction of agricultural soil. Ed. A.S.A.E., P. 440-442.

Barnes, B. T. et F. B. Ellis, 1979. Effects of different methods of cultivation and direct drilling, and disposal of straw residues, on population of earth worms. J. Soil Sci. 30:669-679.

Barnett, G.M. 1982. Utilisation des fumiers et des lisiers sur les cultures. Agdex 538. Rapport du colloque sur les fumiers, p. 57-77.

Bauder, J. W., Randall C. W. et R. T. Schuler, 1985. Effects of tillage with controlled wheel traffic on soil properties and root growth of corn. J. Soil and Water Cons. 40:382-385.

Bélanger, P. 1984. Les effets des dépôts acides et d'autres polluants de l'air sur l'agriculture et sur les érablières. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 72 p.

Behn, E. 1982. More profit with less tillage. Wallace Homestead, Des Moines, Iowa, 132 p.

Benne, E.J., Hoglund, C.R., Longnecker, E.D. et Cook, R.L. 1961. Animal manures what are they worth today? Mich. Agr. Exp. Sta. Circ. Bull. 231.

Benoît, R.E., Willits, N.A et Hanna, W.J. 1962. Effect of rye winter cover crop on soil structure. Agron. J. 54: 419-420.

Bernard, C. 1984. La dégradation des sols et l'environnement. Dans: Journée d'information sur la conservation des sols, Sainte-Foy, p. 33-53.

Bernard, C. 1985. Le contrôle de la pollution agricole diffuse. Assise annuelle. Association Québécoise des techniques de l'eau. Montréal, 8 mars 1985, 29 p.

Blevins, R.L., G. W. Thomas et P.L. Cornelius, 1977. Influence of no-tillage and nitrogen fertilization on certain soil properties after 5 years of continuous corn. Agron. J. 69:383-386.

Bodolay, S. 1974. Wind erosion control on agricultal lands. In: Systems of soil-protecting farming and soil erosion control. Vol. XI, Comm. VI. Moscou.

Boily, R. 1974. Culture du maïs conventionnelle et sur billons. La Semaine du Cultivateur. Min. Agr. Québec, p. 256-271.

Broughton, R.S. 1972. The performance of subsurface drainage systems on two Saint-Lawrence lowland soils. PhD. Thesis. Department of Soil Science, McGill University, Montréal.

Broughton, R.S. 1984. Macdonald College, McGill University, Montréal (Personal communicatin).

Broughton, R.S. et al. 1976. Tests of filter matérial for plastic drain tubes. Third National Symposium Proceedings, ASAE.

Broughton, R, Bonnel, R. et Chirara, K., 1986. The tubing with very narrow slots. Report to the corrugated plastic tubing associaton.

Buhler, D. D. et T. C. Daniel, 1984. Tillage - Weed - Herbicide interactions. Wisconsin weed control results. Vol. 14. Depts. of Agronomy and Horticulture, University of Wisconsin, Madison.

Campbell, D.J., Dickson J.E. et B.C. Ball, 1985. Control seeded traffic on ploughed and direct drilled land under winter barley in Scotland. Paper presentend at the 10th conference of ISTRO, Guelph, Canada.

Campbell, J.A. et J.A. Millette, 1981. Affaissement des sols organiques de l'est du Canada. Station de recherches, St-Jean (Québec), Bulletin technique No. 13, 26 p.

Campbell, C.A., Paul, E.A. et McGill W.B. McGill, 1976. Effect of cultevation and cropping on the amounts and forms of soil nitrozen. In: Proceedings of the Alberta Soil Science Workshop, Western Canada, Nitrozen Symposium, Calgary, p. 7-101.

Cassel, D.K. 1983. Spatial and temporal variability of soil physical properties following tillage of Norfolk loamy sand. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 196-201.

Chaney, K. et Swift, R.S., 1984. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. J. Soil Sci. 35: 223-230.

Chepil, E.S. et Woodruff, N.P., 1963. The physics of wind erosion and its control. Adv. Agron. 15: 211-302.

Clark, II, E.H. 1985. The off site costs of soil erosion. J. Soil and Water Cons. 40 (1): 19-22.

Clarke, H.M., 1981. Minimum, no-tillage versus conventional cropping systems. Macdonald J. 42 (5): 3-4.

Comité sénatorial permanent de l'agriculture, des pêches et des forêts. 1984. Nos sols dégradés. Rapport sur la conservation des sols, Ottawa, 143 p.

Concaret, J. 1981. Eclatements du sol associés au drainage. Dans: Drainage agricole: Théorie et pratique. Edité par la Chambre Régionale d'Agriculture de Bourgogne, pp. 251-261.

Boivin, G. 1985. La lutte biologique dans les réseaux de lutte intégrée. Agriculture. 38 (1): 10-14.

Bolton, E. F., Findlay W. I. et Dirks, V.A., 1977. Effects of depth and time of plowing Brookston clay on yield of corn and tomatoes. Can. Agr. Eng. 19:45-47.

Bos. A.W. 1983. Evaluation of agricultural non-point source control practices. International Joint Commission. 117 p.

Brady, N.C. 1974. The nature and properties of soils. MacMillan Publishing Co., New York.

Conservons notre sol: Pourquoi? Comment? Service du Génie Rural, Ministère de l'Agriculture et de l'Aménagement Rural du Nouveau Brunswick. Ciculaire SC-1, 8p.

Cooke, R.V. et Doornkamp, J.C., 1974. Geomorphology in Environnemental Management. An introduction. 3. Soil erosion by wind. Clarendon Press, Oxford.

Coote, D.R. et Ramsey, J.R., 1983. Quantification of the effects of over 35 years of intensive cultivation on four soils. Can. J. Soil Sci. 63: 1-14.

Coote, D.R., Siminovitch, D., Shahsingh, S., et Wang, C., 1982. Importance des précipitation acides pour l'agriculture dans l'est du Canada. Direction générale de la recherche, Agriculture Canada, Ottawa, 32 p.

Côté, D. 1974. Effet du sous-solage sur le tassement des sols. La Semaine du cultivateur. Min. Agr. Québec, p. 241-250.

Côté, D. 1977. Culture sans travail du sol ("no tillage farming"). Agriculture 33 (4): 17-20.

Boily, R. 1974. Culture du maïs conventionnelle et sur billons. La Semaine du Cultivateur. Min. Agr. Québec, p. 256-271.

Broughton, R.S. 1972. The performance of subsurface drainage systems on two Saint-Lawrence lowland soils. PhD. Thesis. Department of Soil Science, McGill University, Montréal.

Broughton, R.S. 1984. Macdonald College, McGill University, Montréal (Personal communicatin).

Broughton, R.S. et al. 1976. Tests of filter matérial for plastic drain tubes. Third National Symposium Proceedings, ASAE.

Broughton, R, Bonnel, R. et Chirara, K., 1986. The tubing with very narrow slots. Report to the corrugated plastic tubing associaton.

Buhler, D. D. et T. C. Daniel, 1984. Tillage - Weed - Herbicide interactions. Wisconsin weed control results. Vol. 14. Depts. of Agronomy and Horticulture, University of Wisconsin, Madison.

Campbell, D.J., Dickson J.E. et B.C. Ball, 1985. Control seedbed traffic on ploughed and direct drilled land under winter barley in Scotland. Paper presentend at the 10th conference of ISTRO, Guelph, Canada.

Campbell, J.A. et J.A. Millette, 1981. Affaissement des sols organiques de l'est du Canada. Station de recherches, St-Jean (Québec), Bulletin technique No. 13, 26 p.

Campbell, C.A., Paul, E.A. et McGill W.B. McGill, 1976. Effect of cultevation and cropping on the amounts and forms of soil nitrozen. In: Proceedings of the Alberta Soil Science Workshop, Western Canada, Nitrozen Symposium, Calgary, p. 7-101.

Cassel, D.K. 1983. Spatial and temporal variability of soil physical properties following tillage of Norfolk loamy sand. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 196-201.

Chaney, K. et Swift, R.S., 1984. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. J. Soil Sci. 35: 223-230.

Chepil, E.S. et Woodruff, N.P., 1963. The physics of wind erosion and its control. Adv. Agron. 15: 211-302.

Clark, 11, E.H. 1985. The off site costs of soil erosion. J. Soil and Water Cons. 40 (1): 19-22.

Clarke, H.M., 1981. Minimum, no-tillage versus conventional cropping systems. Macdonald J. 42 (5): 3-4.

Comité sénatorial permanent de l'agriculture, des pêches et des forêts. 1984. Nos sols dégradés. Rapport sur la conservation des sols, Ottawa, 143 p.

Concaret, J. 1981. Eclatements du sol associés au drainage. Dans: Drainage agricole: Théorie et pratique. Edité par la Chambre Régionale d'Agriculture de Bourgogne, pp. 251-261.

Boivin, G. 1985. La lutte biologique dans les réseaux de lutte intégrée. Agriculture. 38 (1): 10-14.

Bolton, E. F., Findlay W. I. et Dirks, V.A., 1977. Effects of depth and time of plowing Brookston clay on yield of corn and tomatoes. Can. Agr. Eng. 19:45-47.

Bos. A.W. 1983. Evaluation of agricultural non-point source control practices. International Joint Commission. 117 p.

Brady, N.C. 1974. The nature and properties of soils. MacMillan Publishing Co., New York.

Conservons notre sol: Pourquoi? Comment? Service du Génie Rural, Ministère de l'Agriculture et de l'Aménagement Rural du Nouveau Brunswick. Ciculaire SC-1, 8p.

Cooke, R.V. et Doornkamp, J.C., 1974. Geomorphology in Environnemental Management. An introduction. 3. Soil erosion by wind. Clarendon Press, Oxford.

Coote, D.R. et Ramsey, J.R., 1983. Quantification of the effects of over 35 years of intensive cultivation on four soils. Can. J. Soil Sci. 63: 1-14.

Coote, D.R., Siminovitch, D., Shahsingh, S., et Wang, C., 1982. Importance des précipitation acides pour l'agriculture dans l'est du Canada. Direction générale de la recherche, Agriculture Canada, Ottawa, 32 p.

Côté, D. 1974. Effet du sous-solage sur le tassement des sols. La Semaine du cultivateur. Min. Agr. Québec, p. 241-250.

Côté, D. 1977. Culture sans travail du sol ("no tillage farming"). Agriculture 33 (4): 17-20.

Côté, D. 1982a. Les pratiques culturales. Conseil des productions végétales du Québec. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Agdex 517, 42 p.

Côté, D. 1982b. La régie des épandages de fumier en rapport avec les propriétés physiques et hydrodynamiques des sols. Rapport non publié. 9 p.

Côté, D., 1984. La gestion des sols. Dans: Journée d'information sur la conservation des sols, Sainte-Foy, p. 99-109.

Côté, D. 1985. Effect of tillage practices on the properties of Neubois sitlty loam cultivated continuously with silage corn. 10th Congres, International Soil Tillage Research Organisation, Guelph, Canada.

Côté, D. 1984. Rapport de stage sur les techniques de conservation des sols. Ministère de l'Environnement du Québec. 112 p.

Côté, D. et G. Dupuis, 1980. Effets du sous-solage et du labour profond sur les propriétés physiques du sol et le rendement de la luzerne et du maïs sur loam sableux Chaloupe. Can. J. Soil Sci. 60:345-353.

Conseil des productions végétales du Québec, 1976. Drainage souterrain: Information générale. Agdex 555, 40 p.

Conseil des productions végétales du Québec, 1984a. Drainage sougerrain. Cahier des normes. Agdex 555,
38 p.

Conseil des productions végétales du Québec, 1984b. Réévaluation de la distribution des unités thermiques- maïs au Québec. Bulletin technique no. 7. Agdex 070.

Crosson, P. 1981. Conservation tillage and conventional tillage: A comparative assessment. Soil Con. Soc. Am. 35 p.

Daigle, J.L. 1980. Le contrôle de l'érosion au Nouveau-Brunswick. Dans: Érosion et conservation des sols, 8e Colloque de Génie Rural. Université Laval. p. 75-98.

De Grandmont, J. 1982. Légère hausse des ventes de la pierre à chaux agricole. Les producteurs de pierre à chaux du Québec, Montréal. Agri-Chaux Nouvelles 3(1): 1-2.

Dejou, J., et DeKimpe, C.R., 1984. La compacité des sols et ses conséquences agronmiques: Aperçu bibliographique. Bull. Tech. Info. (Paris). p. 3-15.

De Kimpe, C.R. 1978. Caractériser la structure des sols. Canada Agriculture 23: 13-14.

De Kimpe, C.R. 1978. Compactage et tassement des sols. Canada Agriculture 29: 29-30.

De Kimpe, C.R., Laverdière, M.R. et Zizka, J.,1981. Effet du modelage des champs sur l'hétérogénité des sols et les rendements en maïs-grain. Can. J. Soil Sci. 61:225-236.

De Kimpe, C.R. et Martel, Y., 1984. La matière organique et la structure du sol. Dans: Journée d'information sur la conservation des sols, Sainte-Foy, p. 55-75.

Dickey, E.C., Peterson, T.R., Esenhauer, D.E. et Jasa, P.J., 1985. Soil compaction I : Where, how bad a problem. Crops and Soils Magazine, August-September, p. 12-14.

Dionne, J.L. 1980. Effet du magnésium et du pH du sol sur la luzerne cultivée en serre dans trois types de sol du Québec. Can. J. Soil Sci. 60: 275-284.

Dionne, J.L. 1980. La réaction du sol en relation avec la croissance des végétaux. Dans: Rapport de la journée d'information sur la chaux agricole. Agdex 534.

Dionne, J.L. et Pesant, A.R., 1978. Effets des doses de bore, des régimes hydriques et du pH des sols sur les rendements de la luzerne et du lotier et sur l'assimilabilité du bore. Can. J. Soil Sci. 58: 369-379.

Driver, G. et G. Wall. 1982. An evaluation of cropland soil erosion: estimated costs to agriculture in Ontario. Ontario Institute of Pedology et Plant Industry Branch.

Dubé, A. 1975. L'eau et l'érosion des sols. Ressources. 6(4): 8-15.

Dubé, A. 1980. Le problème de l'acidité des sols au Québec. Agdex 534. Rapport de la journée d'information sur la chaux agricole. Tenue à Saint-Hyacinthe, le 18 octobre, p. 4-7.

Dubé, 1983. Définition et composition du fumier. Dans: Manuel de gestion agricole des fumiers. MAPAQ.

Dubé, A. 1983. Effet de l'incorporation au sol de résidus d'émondage des arbres avec du lisier de porc sur le blé de printemps. Dans: Rapport d'activités, 1982-83, Service de recherche en sols.

Dubé, A. et Gaudette, A., 1980. Les amendements calcaires et leur qualité. Agdex 534. Rapport de la journée d'information sur la chaux agricole tenue à Sainte-Hyacinthe, le 18 octobre, p. 45-55.

Dubé, A., Mehuys, G.R. et Pesant, A., 1984. L'érosion: cause et conséquence de la dégradation des sols. Journée d'information sur la conservation des sols, C.P.V.Q. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Sainte-Foy, Québec.

Evans, L.S. 1982. Effects of acidity in precipitation on terrestrial vegetation. Water Air Soil Pollut. 18:395-403.

Fisk, S.D., 1971. A study of the performance and cost of operation of wheel type drainage trenching machines. M.Sc. Thesis, McGill University Montreal.

Florentin, L. 1986. Communication personnelle.

Fortin. S. 1979. Choix des pneus et ballastage pour une traction maximum? 7e colloque de Geni Rural, Univ. Laval.

Gallichand, J. et Broughton, R.S., 1982. L'irrigation souterraine ou comment irriguer à peu de frais. Le producteur agricole, Nov. p. 26-27.

Gallichand, J., Nisar, M., von Hoyningen Hwene, B. et Broughton, R.S., 1985. Irrigation souterraine: critères d'application, conception et opération. 12e colloque de Génie Rural. Gr.-H-85-01. Udniversité Laval, p. 277-312.

Galloway, H.M. et Griffith, D.R. Which is the best tillage for each soil type. Crops and Soils Magazine, August-September, 1978, p. 10-14.

Gillet, J.P. 1985. Compactage: Limiter les dégats. Cultivar 184: 52-53.

Groenevelt, P.H., Brunsting, S.H. et Simard, R.R., 1984. Organic matter and soil loss update. Progress report 1983. Department of Land Ressource Science, Ontario Institute of pedology.

Gros, A. 1973. Guide pratique de la fertilisation. Ed. Maison Rustique, Paris, 436 p.

Guertin, S.M. 1974. Travail du sol et compactage. La Semaine du Cultivateur, Saint-Hyacinthe. Min. Agr. Québec, p. 272-293.

Guyot, G. 1963. Brise-vent: modification des micro-climats et améliorations dans la production agricole. Ann. Agron. 14: 429-488.

Harmon, L. et Duncan, E.R., 1978. Technical assesment of non-point pollution in Iowa. Summary. Iowa State Univ. p. 36.

Hayes, W.A. 1982. Minimum tillage farming. No-till Farmer, Inc, Brookfield, 167 p.

Hoeft, R.G. et Randall, G.W., 1985. Tillage affects fertility. Crops and Soils Magazine 37, (4): 12-16.

Houde, A. 1972. Les brise-vent. Session d'étude à l'intention des responsables des pépinières. Min. Energie et Ressources du Québec, Serv. Restauration Forestière.

Jacobson, J.S. 1980. The influence of rainfall composition on the yield and quality of agriculture crops. In Proc. Int. Conf. Ecological impact of acid precipitation, eds. Rablos, D. et Tollan, A., 1980. p. 41-46. SNSF. Project, Sandefjord, Norway, 1980.

Janssen, B.J. 1984. A simple method for calculating decomposition and accumulation of "young" soil organic matter. Plant and Soil 76: 297-304.

Jasmin, J.J., Hamilton, H.A., Millette, J., Hogue, E.J., et Bernier, R., 1977. Mise en production des sols organiques. Station de recherches, St-Jean (Québec), Bulletin technique No. 11, 38 p.

Joffe, J.S. 1955. Green manuring viewed by a pedologist. Adv. Agron. 7: 141-187.

Joint Ministerial Committee. 1978. Guidelines for sewage sludge utilisation on agricultural lands. Submitted by Joint Mnisterial Committee of Ontario Ministry of Agriculture and Food, Ontario Ministry of the Environment, Ontario Ministry of Health, April 1978, 28 p.

Julien, C. 1976. Revue Machinerie Lourde, Nov.-Déc. pp. 26.

Ketcheson, J. 1977. Conservation tillage in eastern Canada. J. Soil Water Cons., January-February, 32:57-60.

Kuntze, H. 1976. Soil conservation on cultivated peatlands. Proc. 5th. Int. Peat Congr. Vol. 1:256-269.

Laflen, J.M. et Moldenhauer, W.C., 1971. Soil conservation on agricultural land. J. Soil Water Cons. 26 (6): 225-229.

Lafontaine, P. 1984. Effets phytotoxiques de résidus de piclorame (acide 4 - amino - 3, 5, 6 - Trichloropicolimique) sur le tabac (Nicotiana tabacum L.) Pierre Lafontaine, Thèse de maîtrise, Bio-agronomie, Université Laval, 95 p.

Lagacé, R. 1980a. L'équation universelle des pertes de sols: un outil. Dans: Erosion et Conservation des sols, 8e Colloque de Génie Rural, Université Laval, p. 39-59.

Lagacé, R. 1980b. L'érosion des sols par l'eau et les moyens de conservation. Dans: Erosion et Conservation des sols, 8e Colloque de Génie Rural, Université Laval, p. 1-35.

Lancery, J.M. 1984. La dégradation des sols et l'agriculture. Dans: Journée d'information sur la conservation des sols, Sainte-Foy. p. 11-23.

Lang, F.L. 1979. Runoff water quality as affected by surface applied dairy cattle manure. J. Environ. Qual. 8: 215-218.

Larivière, V. 1985. La terre qui s'envole ... La terre de chez nous. Volume 56, numéro 19, p. 3.

Lawson, N.C. 1981. Crop production with reduced tillage systems. Macdonald J. 42 (5) : 12-13.

Lumkes, L.M. et TeVelde, H.A., 1974. Protection of wind erosion. Minimum cultivation techniques on soils susceptible to blowing when growing sugar beet, potato, etc. in rye as cover crop. Proc. 12th Brit. Weed Conf., Brighton, England: 1073-1079.

Lyles, L. 1977. Wind erosion: Processes and effects on soil productivity. Trans. Am. Soc. Agr. Eng. 20: 880-884.

MacKenzie, A.F. 1981. Is minimum tillage a good idea for the soils of Quebec? Macdonald J., 42 (5) : 3-4.

MacRae, R.J. et Mehuys, G.R., 1985. The effect of green manuring on the physical properties of temperate-area soils. Adv. Soil Sci. 3: 71-94.

Martel, Y.A. et MacKenzie, A.F., 1980. Long-term effects of cultivation and land use on soil quality in Quebec. Can. J. Soil Sci. 60: 411-420.

Martel, Y.A. et Paul, E.A., 1974. Effects of cultivation of the organic matter of grassland soils as determined by fractionation and radiocarbon dating. Can. J. Soil Sci. 54:419-426.

Martel, Y.A. et Deschênes, J.M., 1976. Les effets de la mise en culture et de la prairie prolongée sur le carbone, l'azote et la structure de quelques sols du Québec. Can. J. Soil Sci. 56: 373-383.

McConkey, O.M. 1952. Conservation in Canada. J.M. Dent & Sons (Canada) Limited, Toronto, XIX, 215 p.

McKyes, E. 1974. Influence de la circulation des machines agricoles sur le compactage du sol. La semaine du Cultivateur, Saint-Hyacinthe. Min. Agr. Québec, p. 227-240.

McKyes, E. 1981. Reduced and no-tillage systems. Macdonald Journal, 42 (5) : 5-6.

Mehuys, G. 1981. L'érosion par l'eau. Conseil des productions végétales du Québec. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Agdex 572, 15 p.

Mehuys, G. 1984 . Soil degradation in Quebec : Is there cause for concern? Macdonald J. 45(3):28-31.

Mehuys, G. 1984. Soil degradation of agricultural land in Quebec : A review and impact assessment. Background paper, Science Council of Canada, Ottawa, 58 .

Mehuys, G. et McKyes, E., 1985. Gare à la compaction du sol. Le Producteur de lait québécois. 11:35-36.

Mehuys, G. et Kerby, T.C., 1986. Implications of seasonal variability of soil loss erosion on crop production. Proceedings of the Canadian agricultural out look conference. Agriculture Canada, Ottawa, p. 114-122.

Menet, M. et Juste, C., 1978. Intérêt du semis direct du maïs pour le contrôle de l'érosion éolienne dans les sols sableux des landes de Gascogne. Ac. Agr. France 64 (8) : 608-615.

Mnkeni, P.N.S. et MacKenzie, A.F., 1981. Effects of sulfur and phosphorus fertilisation on the yield and quality of barley in three south western Quebec soils. Can. J. Soil. Sci.: 61: 351-359.

MOI. 1982a. United States - Canada, Memorandum of intent on transboundary air pollution: Atmospheric sciences and analysis work group 2. Final report.

MOI. 1982b. United States - Canada, Memorandum of intent on Transboundary air pollution: Emissions costs and engineering assessment work group 3b. Final report.

MOI. 1983. United States - Canada, Memorandum of intent on transboundary air pollution: Impact assessment work group I. Final report.

Moldenhauer, W.M., Lovely, W.G., Swanson, N.P. et Currence, H.D., 1971. Effect of row grades and tillage systems on soil and water losses. J. Soil Water Cons. 26: 193-195.

Moore, N., Ketcheson, J. et Fish, P., 1979. Control of soil erosion. Ont. Min. of Agriculture and Food. Factsheet Agdex 573 Toronto, Ontario.

Morgan, J.L. 1974. Utilisation de latex de PVA pour empêcher la dégradation par le vent des sols légers. Plasticulture 22: 55-67.

Naarding, W.H. 1977. A review on International experience with trenchless versus trenching drainage machines. Government Service for Land and Water Use, Ministry of Agriculture and Fisheries, The Netherlands.

Nahal, I. 1975. Principes de conservation du sol. Coll. de géographie applicable. Paris, Masson, 140 p.

Negi, S.C., McKyes, E., Taylor, F., Douglas, E. et Raghavan, G.S.V., 1980. Crop performance as affected by traffic and tillage in a clay soil. Trans ASAE 23 : 1364-1368.

Nelson, P. et Miller, M.H., 1980. Corn root growth as affected by soil texture and bulk density. Progress report. Dept. of Land Resource Science and Ontario Inst. of Pedology Guelph, pp.47-49.

Oades, J.M. 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. Plant and Soil 76: 319-337.

Olson, A. 1982. The impacts of acid deposition on N and S cycling. Proc. Conf. Response of agricultural soils to acid deposition, eds. M.F. Arthur et C.K. Wagner, pp. 2-13, 2-34. Electrical power Research Institute. Columbus.

Parent, L.E. 1982. Les causes de l'érosion éolienne et ses dommages en milieu agricole, contribution No. J.816 Agr. Canada, St-Jean.

Parent, L.E. 1984. Agriculture Canada Research Station, Saint-Jean (Personal communication).

Parent, L.E. et Bélanger, A., 1985. Comparison between Frewdlich and fixed regression models of linuron retention by organic soil materials. J. Environ. Sci. Health A 20(3): 293-304.

Parent, L.E., Millette, J.A. et Bourbeau, G.A., 1980. Lutte contre l'érosion éolienne des sols pulvérulents du Québec. 8e colloque Génie Rural, Un. Laval, érosion et conservation, p. 101-135.

Parent, L.E., Pauzé. F.J. et Bourbeau, G.A., 1983. Description micromorphologique d'un horizon Oh sensible à l'érosion. Naturaliste Can. (Rev. Ecol. Syst.), 110: 483-486.

Perrey, C. 1981. Taupage associé au drainage. Dans: Drainage agricole: Théorie et pratique pp. 262-276. Edité par la Chambre régionale d'Agriculture de Bourgogne.

Pesant, A.R. 1979. The effectiveness of erosion control in no-till corn production. The 8th Conference of the international Soil Tillage Research Organization University of Hohenheim, ISTRO, Bundes republik Deutschland, 5 p.

Pesant, A.R. 1984. Les dangers de la culture du maïs dans les régions à topographie accidentée. Canada Agriculture 30(2):34-37.

Pesant, A., Mehuys, G. et Dubé, A., 1980. L'érosion du sol par l'eau au Québec. Dans: Érosion et conservation des sols, 8e Colloque de Génie Rural, Université Laval, p. 61-74.

Pickwell, R.C. 1974. Wind damage on sand land. Brit. Sugar Beet Rev. 42 (3): 177-181.

Potter, D.A, Barry, L.B. et Gordon, F.C., 1985. Effect of N fertilization on earthworm and microarthropod populations in Kentucky bluegras turf. Agron. J. 77: 367-372.

Prairie Farm Rehabilitation Administration (PFRA). 1983. Land Degradation and Soil Conservation Issues on the Canadian Prairies. Soil and Water Conservation Branch, Agriculture Canada. 326 pp.

Raghavan, G.S.V. et McKyes, E., 1983. Physical and hydraulic characteristics in compacted clay soils. J. Terramechanics 19 : 235-242.

Raghavan, G.S.V., McKyes, E. et Beaulieu, B., 1977. Prediction of clay soil compaction. J. Terramechanics 14 : 31-38.

Raghavan, G.S.V., McKyes, E., Gendron, G. Borglum, B. et Le, H.H., 1978. The effect of soil compaction on the development and yield of corn. Can. J. Plant Sci. 58 : 435-443.

Rickey, C.B., Griffith, D.R. et S.D. Parsons, 1977. Yields and cultural energy requirements for corn and soybeans with various tillage -planting systems. Adv. Agron. 29: 141-180.

Ripley, P.O., Kalbfleisch, W.M., Bourget, S.J. et Cooper, D.G., 1962. L'érosion du sol par l'eau au Canada. Agriculture Canada, publication 1083, 38 p.

Robertson, L.S., et Erickson, A.E., 1978. Soil compaction: Symptoms. Crops and Soil magazine, Jan. 1978, p. 11-14.

Robertson, L.S., et Erickson, A.E., 1978. Soil compaction: Causes. Crops and Soil Magazine, Feb. 1978, p. 7-9.

Robertson, L.S. et Erickson, A.E., 1978. Soil compaction: Remedies. Crops and Soil Magazine, March 1978, p. 8-10.

Robertson, L.S. et Mokma, D.L., 1977. Crop residue and tillage considerations in energy conservation. Energy facts. Cooperative Extension Service, Michigan State University. Bull. E-1123-6.

Robertson, L.S., Price, H.C., Warneke, D.D. et Mokma, D.L., 1978. Wind erosion. A major problem on organic soil. File no. 32.21 Coop. ext. Serv., Mich. State Univ.

Rollin, A.L. et Bolduc, G., 1985. Les aspects à considérer lors du choix d'un filtre. Dans: La recherche en drainage souterrain, 12e Colloque de Génie rural, Université Laval.

Saint-Yves, A. 1985. La bonne pratique de la valorisation agricole des boues. Assises annuelles de l'Association Québécoise des techniques de l'eau, Montréal, 7 mars 14 pp.

Sauriol, P. 1985. La terre noire s'envole. Le Producteur agricole. 8: 8-9.

Sauriol, P. et L. Brodeur, 1985. POur l'avenir: la lutte dirigée. Agriculture. 42(3):29-30.

Schertz, D.L. 1983. The basis for soil loss tolerances. J. Soil Water cons. 38(1):10-14.

Service de la Protection de l'Environnement, 1985. L'épandage des eaux usées traitées et des boues d'épuration d'origine urbaine. Guide SPE 6-EP-84-1. Janvier 1985. 190 p.

Sharma, R.B. et Verma, G.P., 1971. Effect of compaction of black cotton soils on the uptake of N,P, and K by wheat. Indian J. Agr. Res. 5. (3): 165-171.

Smika et Shorman, 1983. Atrazine carry over in conservation tillage systems. J. Soil Water Cons. Vol. 38, no. 3, p 239.

Soltner, D. 1982. Les bases de la production végétale. Tome I. 11e Edition. Collection Sciences et techniques agricoles, Sainte-Gemme-Sur-Loire, 456 p.

Sorenson, L.H. 1967. Duration of amino acid metabolites formed in soils during decomposition of carbohydrates. Soil Sci. 104:234-241.

Stewart, B.A., Woolhiser, D.A., Wischneier, W.J., Caro, J.H. et Frere, M.H., 1975. Control of water pollution from crop land Vol. I. A Manual for Guideline Development. EPA-600/2-75-026a; A.R.S.-H-5-1. Hyattsville, Maryland.

Sturrock, J.W. 1975. The control of wind in crop production. In: Tramp, S.W. et J.J. Bouma (Ed.). Progress in Biometeorology (C) Progress in plant Biometeorology. Swets et Zeitlinger B.V. Amsterdam.

Switzer-Howse, K.D. 1982. Agricultural management practices for improved water quality in the Canadian Great Lakes Basin. Research Branch, Agriculture Canada, Land Resource Research Institute, Contribution No. 82-10.

Thomas, G.W. et Blevins, R.L., 1977. Fertility management for no-till corn production systems. Abst. Amer. Soc. Agron. Ann. Meetings, Nov. 13-18. Los Angeles, California.

Trafford, B.D. 1970. Problèmes soulevés par le drainage des sols lourds et mesures à prendre pour améliorer le fonctionnement des systèmes de drainage. Commission européenne d'Agriculture, F.A.O.

Unger, P.W. 1984. Tillage effects on surface soil physical conditions and sorghum emergence. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 1423-1432.

Van Vliet, L.J.P., Wall, F.J. et Dickinson, W.T., 1978. Soil erosion from agricultural land in the Canadian Great Lakes Basin. I.J.C. Pluarg Final Report. Windsor, Ontario.

Veihmeyer, F.J. et Hendrickson, A.H., 1948. Soil density and root penetration. Soil Sci., 65: 489-493.

Vez, A. 1977. Dix ans d'expérience de culture sans labour. Revue Suisse d'Agriculture. Mars: 59-70.

Voorhees, W.B. et Lindstrom, M.J., 1984. Long term effects of tillage method on soil tilth independant of wheel traffic compaction. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 152-156.

Vitrox, O. 1985. Phénomènes, mécanismes et remèdes au tassement. Cultivar 184 : 55-61.

Vyn. T.J., Daynard, T.B. et Ketcheson, J.W., 1979. Tillage Practices for Field Crops in Ontario. Ont. Agricultural College, No of Guelph; Ont. Min. of Agriculture and Food, and Ont. Ministry of the Environnement. Toronto, Ontario.

Watson, A.K. 1981. Weeds and less tillage. Macdonald J., 42 (5): 6-7.

Webber, M.D. 1984a. Waste metals - The Canadian approach for limiting metals on land from municipal sludges. Symposium papers and abstracts of contributed papers. Northeastern Branch ASA and Eastern section CSA. Université Laval June 24-27. p. 5-9.

Webber, M.D. 1984b. Epandage des boues résiduaires sur les sols -une évaluation. Direction générale de la recherche. Agriculture Canada. 45 p.

Webber, M.D. et Bole, M.B., 1978. Epandage des effluents et des boues résiduaires. Agdex 040. Rapport de l'Assemblée générale du Conseil des productions végétales du Québec. Tenue à Sainte-Foy le 8 novembre p. 26-34.

Wischmeir, W.H. et D.D. Smith, 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation on planning. U.S. Dept. of Agriculture. Agriculture Handbook. No 237. 58 p.

Wojahn, E. 1960. Veber Die Standortverbesserung flochgründiger, sandunterlagerter Niedermoore durch Anlage von Pflusanddeckkulturen. Zeitsch. F. Landesk. 1(1/2): 31-71. Akademie Verlag Berlin.

Woodruff, N.P., Lyles, Lo, Siddoway, F.H. et Fryrear, D.W., 1977. How to control wind erosion. Agr. Inf. Bull. no. 354, USDA. 22 p.

Young, H.M. 1982. No-tillage farming. No-till farmer Inc. Brookfield, 202 p.

ANNEXE 1

GLOSSAIRE

Adhésivité: Propriété que présente les particules de sol d'adhérer aux pièces travaillantes des instruments de culture.

Agrégat: Assemblage de particules de sol adhérant entre elles par des ciments argilo-humiques et formant des unités aux formes plus ou moins géométriques.

Battance: Destruction de la structure du sol par le martellement des gouttes de pluie suivie par la formation d'une croûte superficielle.

Capacité d'échange cationique: Représente la quantité maximale de cations de toutes sortes (ex: K^+, Na^+, NH_4^+, Ca^{++}, Mg^{++}) qu'un poids déterminé de sol (100 g) peut retenir. Elle s'exprime en milli. équivalent pour 100 g de terre.

Cohésion: Propriété qui permet aux particules de sol (terre fine et agrégats) de rester associées les unes aux autres.

Colmatage: En terme de drainage, obturation des fentes ou de la lumière des drains ou des collecteurs.

Complexe argilo-humique: Ensemble constitué par de l'argile et de l'humus, tous deux à l'état floculé, et ayant la propriété de retenir à sa surface des ions provenant de la solution du sol.

C/N: Rapport entre la masse de carbone et la masse d'azote des matières organiques.

Cryptogamique: Affectation parasitaire des végétaux provoquées par les champignons.

Densité apparente: Poids de l'unité de volume du sol en place sans tassement.

Edaphique: Représente les caractéristiques physiques (texture, structure) et chimiques (teneurs en sels minéraux, en matières organiques, acidité ...) des sols.

Enzyme: Substance présente à très petite dose permettant la réalisation et l'activation des réactions biochimiques.

Eutrophisation: Dégradation de la qualité des eaux provoquées par des apports excessifs d'éléments minéraux (phosphates et nitrates en particulier).

Façon culturale: Opération à l'aide d'un instrument visant à préparer le sol avant l'ensemencement ou le repiquage et, plus tard, à le désherber et à l'ameublir.

Humidification: Ensemble des transformations qui aboutissent à la formation d'humus stable à partir de matière organique.

Minéralisation: Transformation de la matière organique fraîche en éléments minéraux assimilables par les plantes.

Point de flétrissement: Pourcentage d'humidité du sol à partir duquel une plante commence à souffrir de sècheresse car l'eau contenue dans le sol est inutilisable par la plante.

Pratique culturale: Combinaison de plusieurs façons culturales primaires et/ou superficielles.

Saltation: Mouvement des particules moyennes de sol par bonds de quelques dizaines de centimètres de hauteur et d'environ 1 mètre de longueur.

Stabilité structurale: Résistance de la structure d'un sol aux agents de dégradation (eau, instruments de travail du sol ...).

Till: Dépôts glacières constitués d'argile, de limon, de sable, de gravier et de pierres mélangées dans des proportions très diverses.

En cas de non-livraison — Port de retour garanti

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE,
DES PÊCHERIES ET DE L'ALIMENTATION
DU QUÉBEC
200-A, CHEMIN SAINTE-FOY
QUÉBEC G1R 4X6

Canada Post Postage paid / Postes Canada Port payé
First class / Première classe
Permis No. 2905
Québec, Qué.

Gouvernement du Québec
Ministère de l'Agriculture,
des Pêcheries et de l'Alimentation